



Klimawandel in Süddeutschland

Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen

Klimamonitoring im Rahmen der Kooperation KLIWA



Monitoringbericht 2016



Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung.....	3
1 Außergewöhnliche und extreme Ereignisse 2011–2015.....	7
1.1 Lufttemperatur.....	7
1.2 Niederschlag.....	8
1.3 Hochwasser.....	11
1.4 Niedrigwasser.....	12
2 Klimamonitoring im Rahmen der KLIWA-Kooperation.....	14
3 Methodisches Vorgehen.....	15
4 Lufttemperatur.....	17
4.1 Bisherige Auswertungen	17
4.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung.....	17
4.3 Neue Ergebnisse	18
5 Niederschlag.....	24
5.1 Bisherige Auswertungen	24
5.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung.....	24
5.3 Neue Ergebnisse	25
6 Hochwasserabflüsse	31
6.1 Bisherige Auswertungen	31
6.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung.....	31
6.3 Neue Ergebnisse	32
7 Niedrigwasserabflüsse.....	37
7.1 Bisherige Auswertungen	37
7.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung.....	37
7.3 Neue Ergebnisse	38
8 Mittlere Abflüsse.....	42
8.1 Bisherige Auswertungen	42
8.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung.....	42
8.3 Neue Ergebnisse	42
9 Grundwasserstände und Quellschüttungen	47
9.1 Bisherige Auswertungen	47
9.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung.....	47
9.3 Neue Ergebnisse	48
9.3.1 Grundwasserstände und Quellschüttungen.....	48
9.3.2 Langzeitsimulation von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung.....	51
10 Langzeitverhalten im Bodensee	54
10.1 Wasserstand.....	54
10.2 Temperatur und Durchmischung.....	55
11 Voraussetzungen für das weitere Klimamonitoring.....	57
12 Literaturverzeichnis.....	58

Impressum

Bearbeiter des Monitoringberichts 2016:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (Federführung): Alana Steinbauer & Holger Komischke

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: Vassilis Kolokotronis

Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz: Dr. Andreas Meuser & Christian Iber

Deutscher Wetterdienst: Dr. Monika Rauthe & Dr. Thomas Deutschländer

Bilder Frontseite: Oben und Unten – LfU RLP Christian Iber; Mitte – Bergwacht Penzberg

Bilder Kapitel 11: Links - Störmer; Rechts – Mahringer

Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit Zustimmung der Herausgeber unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

Zusammenfassung

Das Monitoring zum Klimawandel in Süddeutschland ist ein wichtiger Projektbereich der KLIWA-Kooperation, mit dem die Thematik „Klimawandel und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ bearbeitet wird. Damit ist ein langfristig angelegtes, einheitliches Vorgehen beabsichtigt, durch das verschiedene relevante meteorologische und hydrologische Kenngrößen in ihrer zeitlichen Entwicklung erfasst und in regelmäßigen Abständen zeitnah ausgewertet werden sollen, um die Auswirkungen des Klimawandels zu verfolgen. Diese Auswertungen werden in Klimamonitoringberichten veröffentlicht. Bisher wurden die Langzeituntersuchungen als KLIWA-Berichte sowie als Monitoringberichte in 2008 und 2011 herausgegeben. Mit diesem aktuellen Klimamonitoringbericht 2016 sollen Veränderungen des regionalen Klimas und des Wasserhaushalts in den KLIWA-Bundesländern Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz bis zum Jahre 2015 dokumentiert und bewertet werden. Zusätzlich werden erstmals außergewöhnliche und extreme Ereignisse des Zeitraums 2011–2015 und das Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse dargestellt. Die Untersuchungen in diesem Bericht sind die Fortführung der in KLIWA durchgeführten Langzeituntersuchungen und beschreiben wesentliche Ergebnisse unter Berücksichtigung der Veränderungen in den letzten 15 Jahren. Die Kernaussagen zur Klimaentwicklung in Süddeutschland lassen sich für die einzelnen, den Wasserhaushalt beeinflussenden Kenngrößen, wie folgt zusammenfassen:

Lufttemperatur

- Im Zeitraum 2011 bis 2015 zeigt sich für die Lufttemperatur vor allem eine vermehrte Anzahl an überdurchschnittlich warmen Jahren, inklusive Hitzeperioden und extrem hohen Temperaturen. Drei von fünf Jahren (2011, 2014 und 2015) liegen unter den zehn wärmsten Jahren bundesweit und in den KLIWA-Bundesländern seit Beginn flächendeckender Messungen in 1881.
- 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 Jahre; Sommerhalbjahr: +0,8 bis +1,2 °C/85 Jahre).
- Für fast alle Monate zeigen sich Zunahmen der mittleren Lufttemperatur. Die stärksten positiven Trends im Jahresverlauf sind für den Zeitraum 1931–2015 und dabei in den Monaten Dezember, Januar, März und August zu finden. Nur im Monat September sind über den Gesamtzeitraum teilweise leicht negative Trends zu beobachten, die aber nicht signifikant sind.

Niederschlag

- Im Zeitraum 2011 bis 2015 sind eine Vielzahl von meist lokal begrenzten Starkregenereignissen in den KLIWA-Bundesländern aufgetreten. Außerdem waren die KLIWA-Gebiete auch durch eine extreme Trockenheit im Jahr 2015 geprägt. Im Deutschlandsmittel fielen im Jahr 2015 etwa 10 % zu wenig Niederschlag, in den KLIWA-Bundes-



ländern betrug das Niederschlagsdefizit im Durchschnitt ca. 23 % im Vergleich zur Referenzperiode 1961 bis 1990 (Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz ca. –24 %, Bayern ca. –21 %).

- Die Trends (1931–2015) 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 sind eine Zunahme der positiven Trends im Sommerhalbjahr und eine Abschwächung der negativen Trends im Winterhalbjahr zu beobachten.
- Die Trends im Starkniederschlag (Dauer=24h) sind uneinheitlicher als im Gebietsniederschlag. Hier gibt es weiterhin regional klare positive Trends im Winterhalbjahr (bis +33 %), 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. Aussagen über Kurzzeitergebnisse (< 1 Tag) konnten mit dieser Studie wegen der zu kurzen Messreihen und dem weniger dichten Messnetz mit hoher zeitlicher Auflösung nicht getroffen werden.

Hochwasserabflüsse

- 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.
- Für den gesamten betrachteten Zeitraum 1932 bis 2015 ergeben sich im KLIWA-Untersuchungsgebiet überwiegend Trends zu steigenden Hochwasserabflüssen im Gesamtjahr bei ca. 69 % der Pegel. Dies gilt in gleicher Weise auch für das hydrologische Winterhalbjahr (ca. 71 % der Pegel) und in abgeschwächter Form im Sommerhalbjahr (ca. 58 % der Pegel). Von den ermittelten Zunahmen sind allerdings nur 40 bis 50 % der Trends signifikant.
- Im Vergleich lassen sich für die Zeiträume 1932 bis 2000, 1932 bis 2010 und 1932 bis 2015 relativ ähnliche Ergebnisse erkennen. Durch die Zeitreihenverlängerung bis 2015 schwächen sich die zunehmenden Trends allerdings leicht ab.
- Die Betrachtung des Jahresgangs der monatlichen Abflusshöchstwerte zeigt analog zu den vorausgehenden Klimamonitoringberichten, dass die Erhöhung im hydrologischen Winterhalbjahr weiterhin ausgeprägter ist; dies ist für einen Großteil der Gebiete Süddeutschlands auch die Jahreszeit mit der größten Hochwassergefährdung.

Niedrigwasserabflüsse

- 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 Niederschlagsdefizits neue Niedrigstwerte bei den Abflüssen auftraten.
- Insgesamt zeigt sich für die jährlichen Niedrigstwasserabflüsse (Tageswerte / 7-Tages-Mittel) eine knappe Mehrheit von zunehmenden Trends für den Zeitraum 1951 bis 2015 (ca. 60 % der Pegel). Eine deutliche Tendenz ist jedoch nicht abzulesen, da die ermittelten Veränderungen mehrheitlich nicht signifikant sind.

- Die verkürzten Zeitreihen ab 1974 zeigen ohne Berücksichtigung der Trends signifikanz vermehrt abnehmende Tendenzen. Dies betrifft bei den Zeitreihen bis 2015 ca. 55 % bis 60 % der Pegel.
- Die maximale Dauer von Niedrigwasserperioden war überwiegend rückläufig; dies deutet auf eine Entspannung der Niedrigwassersituation in den letzten Jahren hin. Jedoch ist nur ungefähr die Hälfte der ermittelten Trends signifikant.
- Bei der Interpretation der Ergebnisse sollte beachtet werden, dass die Abflüsse im Niedrigwasserbereich sehr sensibel auf wasserwirtschaftliche Nutzungen am Gewässer reagieren. Bei den Untersuchungen der Niedrigwasserabflüsse kann eine Beeinflussung durch wasserwirtschaftliche Nutzungen nicht ausgeschlossen werden. Diese kann klimatisch bedingte Veränderungen überlagern.

Mittlere Abflüsse

- Insgesamt lässt sich aus den Untersuchungen schlussfolgern, dass für den gesamten betrachteten Zeitraum 1932 bis 2015 im Gesamtjahr die Trends relativ ausgeglichen sind. Im Winterhalbjahr hingegen überwiegen die Pegel mit steigenden Abflüssen (ca. 75 % der Pegel), während im Sommerhalbjahr an 70 % der Pegel mehrheitlich abnehmende Abflüssen zu beobachten sind. Von den ermittelten Veränderungen sind allerdings im Mittel nur knapp 40 % der Trends signifikant.
- Im Vergleich lassen sich für die Zeiträume 1932 bis 2000, 1932 bis 2010 und 1932 bis 2015 Unterschiede erkennen. Durch die Zeitreihenverlängerung bis 2015 geht die Anzahl der Pegel mit zunehmenden Trends vor allem im Gesamtjahr deutlich zurück. Im Gegensatz hierzu nehmen im Sommerhalbjahr Pegel mit abnehmenden Trends zu.
- Die Betrachtung des Jahresgangs der monatlichen Abflusswerte zeigt, dass die Erhöhung im hydrologischen Winterhalbjahr weiterhin ausgeprägter ist; diese Trends schwächen sich allerdings aufgrund der Zeitreihenverlängerung ab. Im Sommerhalbjahr dagegen ist insgesamt betrachtet eine eher kontinuierliche Abnahme der mittleren Abflüsse vorhanden.
- Bei den kurzen Kollektiven ab 1974, die das Verhalten der jüngeren Vergangenheit zeigen, dominieren eindeutig die Abnahmen sowohl bei den mittleren Abflüssen des Jahres als auch der beiden Halbjahre.
- Die zunehmende Tendenz bei den Zeitreihen ab 1932 und die abnehmende Tendenz bei den Zeitreihen ab 1974 weist darauf hin, dass die mittleren Abflüsse des Jahres und des Winterhalbjahres nach 1974 im Mittel größer als vor 1974 sind. Diese Abflusserhöhung ist jedoch aufgrund der fallenden Trends nach 1974 eindeutig rückläufig. Im Sommerhalbjahr dagegen ist insgesamt betrachtet eine eher kontinuierliche Abnahme der mittleren Abflüsse vorhanden.

Grundwasserstände und Quellschüttungen

- Von 125 untersuchten Messstellen mit sehr langen Beobachtungsreihen in den KLIWA-Ländern, weisen zwei Drittel für die jeweilige Gesamtzeitspanne bis 2015 eine Tendenz hin zu niedrigeren Grundwasserständen und Quellschüttungen auf. Für Teilzeitreihen nach 1990 ergibt sich ein vergleichsweise uneinheitliches Gesamtbild, bei dem lediglich noch knapp ein Drittel der Messstellen signifikante Abnahmen aufweisen.
- Signifikante Veränderungen im innerjährlichen Verlauf (Saisonalität) lassen sich bei zahlreichen Messstellen beobachten. So tritt der Maximalwert innerhalb eines Jahres,



bezogen auf den jeweiligen Gesamtbeobachtungszeitraum bis 2015, häufig in den Monaten März bis Mai auf. Ermittelt man diesen Zeitpunkt gleitend über die jeweilige Gesamtzeitreihe, so zeigt sich bei 49 % der Messstellen eine statistisch signifikante Tendenz zu einem immer früheren Auftreten des Maximums (im Mittel etwa 0,5 Tage/Jahr, also einer Verschiebung von 4 bis 6 Wochen seit 1950).

- Die jährlichen Grundwasserneubildungsraten im Zeitraum 1951 bis 2002 waren durch einen Wechsel von zum Teil auch mehrjährigen Nass- und Trockenperioden charakterisiert, wobei die Auffüllung der Grundwasserspeicher überwiegend während der neubildungsreichen Nassjahre erfolgte. Im Gegensatz dazu wies die Periode 2003 bis 2015 mit durchschnittlichen bis trockenen, d.h. neubildungsarmen Jahren, eine geringe Variabilität in regional unterschiedlicher Ausprägung auf. Besonders deutlich zeigt sich diese Entwicklung während der vergangenen 5 Jahre (2011–2015). In diesem Zeitraum betrug die mittlere jährliche Grundwasserneubildung in Süddeutschland nur 85 % vom langjährigen Mittel.

Verhalten des Bodensees

- Seit etwa den 1990er Jahren fällt ein im Mittel deutlich niedrigerer sommerlicher Wasserstand auf. Verschiedene Einflussfaktoren kommen dabei als Ursache in Frage: Wärmere Winter haben die Schneespeicherung im alpinen Einzugsgebiet verringert, wodurch im Frühjahr und Sommer weniger Schmelzwasser in den Bodensee fließt. Veränderungen bei der Verdunstung und den Niederschlagsmengen sind weitere plausible Ursachen. Im Winter sind die mittleren Pegelstände dahingegen etwas gestiegen.
- Die Wassertemperaturen des Bodensees weisen, ähnlich wie die Lufttemperaturen, eine deutliche Erwärmung auf, welche in den oberen Wasserschichten stärker ausfällt als im Tiefenwasser. Die Temperaturverhältnisse sind einerseits für viele biologische und hydrochemische Vorgänge direkt von Bedeutung. Sie sind andererseits maßgeblich für die vertikale Durchmischung des Sees, insbesondere für den winterlichen Tiefenwasseraustausch.
- Mit der Erwärmung des Bodensees hat sich die winterliche vertikale Durchmischung des Bodensees verschlechtert und es treten häufiger mehrjährige Phasen auf, in denen das Tiefenwasser nur unzureichend mit sauerstoffreichem Wasser aus den oberen Schichten durchmischt wird. Seit es gelungen ist, den Bodensee wieder in einen nährstoffarmen See zurückzuführen, traten keine kritischen Sauerstoffwerte mehr auf. Der nachteilige Einfluss der tendenziell schlechteren Durchmischung ist dennoch in den Sauerstoffkonzentrationen des Tiefenwassers erkennbar.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die dargestellten Untersuchungsergebnisse und ihr Vergleich mit den vorausgehenden Betrachtungen die Zweckmäßigkeit des Klimamonitorings deutlich aufzeigen. Aus den unterschiedlichen Bestandsaufnahmen zu den verschiedenen Kenngrößen kann gefolgert werden, dass sich der Klimawandel in Süddeutschland in unterschiedlicher Weise bereits deutlich bemerkbar macht und weiter fortsetzt.

Eine Fortführung des Klimamonitorings ist ein erklärtes Ziel im Rahmen des KLIWA-Untersuchungsprogrammes. Das setzt weiterhin flächendeckende meteorologische und hydrologische Messnetze voraus, mit denen langfristig und kontinuierlich Messdaten gewonnen werden. Sie sind zudem hinsichtlich der heutigen und zukünftigen fachlichen Anforderungen zu optimieren und in erforderlichem Maße weiter auszubauen. Ohne umfassende Messdaten sind Aussagen zur Vergangenheit und eine Abschätzung der möglichen zukünftigen Entwicklung in der heute erforderlichen Qualität nicht möglich.

1 Außergewöhnliche und extreme Ereignisse 2011–2015

In dem vorliegenden Monitoringbericht werden erstmals auch außergewöhnliche und extreme Ereignisse in dem Zeitraum 2011 bis 2015 dargestellt. Ergänzend zu den bisherigen Trendbetrachtungen mit der fortschreitenden Aktualisierung um jeweils fünf Jahre prägen diese Ereignisse das Gesamtbild über diesen Zeitraum, da sie häufig ihr Echo in den Medien gefunden haben. Allerdings verändern sie in der Regel nicht den langjährigen Trend der betrachteten Mittelwerte. In diesem Kapitel werden Extreme der hydrometeorologischen Größen Lufttemperatur, Niederschlag, Hochwasser und Niedrigwasser basierend auf Auswertungen der einzelnen Bundesländer und des DWD betrachtet. Dabei handelt es sich um die gleiche Datenbasis, wie für die langjährigen Auswertungen ab Kapitel 4 in diesem Bericht. Diese können nur eine subjektive Auswahl darstellen, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Bei Aussagen zum langjährigen Mittel wird in diesem Kapitel stets Bezug zu dem Mittelwert der Referenzperiode 1961–1990 genommen, sofern nicht anders beschrieben. Untersuchungen zu Extremereignissen über längere Zeiträume wurden in KLIWA bisher zu Starkniederschlägen [KLIWA Heft 8] und Niedrigwasserverhältnissen [KLIWA Heft 14] durchgeführt.

1.1 Lufttemperatur

Im Zeitraum 2011 bis 2015 zeigt sich für die Lufttemperatur vor allem eine vermehrte Anzahl an warmen Jahren inklusive Hitzeperioden und extrem hoher Temperaturen. Ein Vergleich der wärmsten Jahre in Deutschland und in den KLIWA-Bundesländern ist in Abbildung 1 dargestellt. Drei von fünf Jahren (2011, 2014 und 2015) liegen unter den zehn wärmsten Jahren in Deutschland und in den KLIWA-Bundesländern seit Beginn flächendeckender Messungen in 1881. In Baden-Württemberg zusätzlich das Jahr 2012.

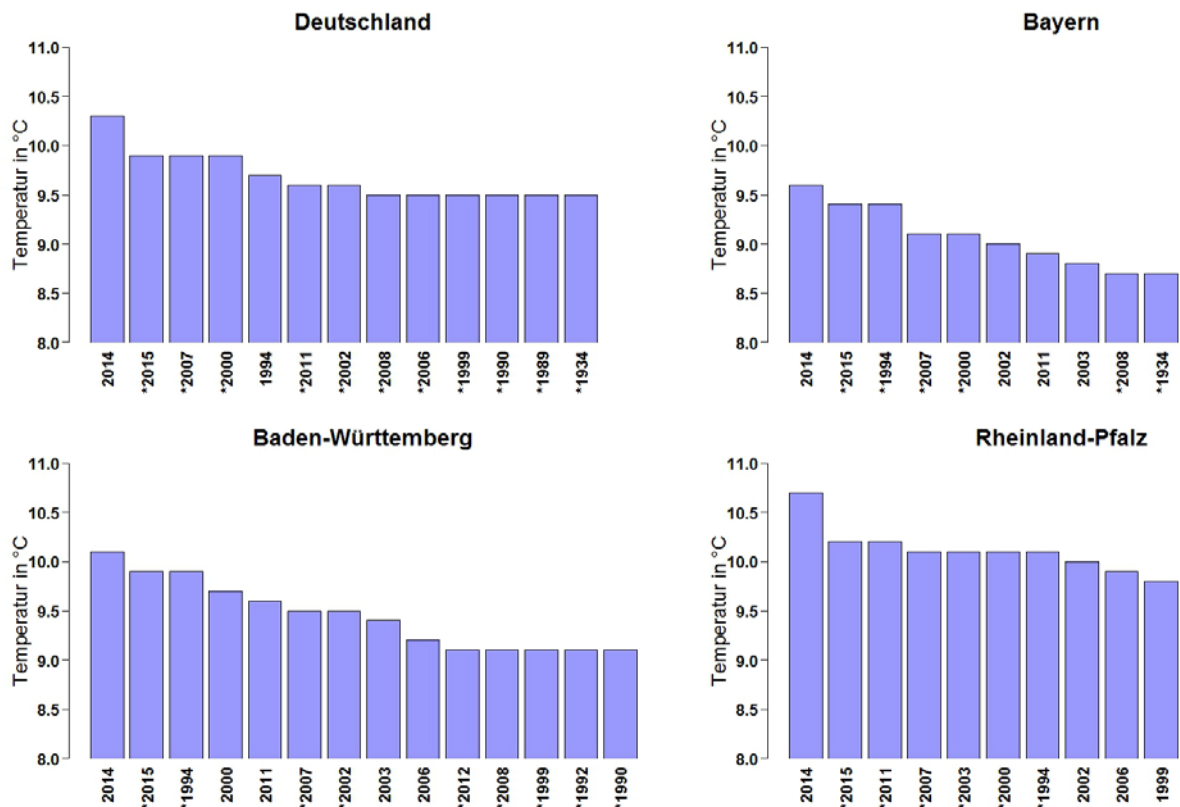


Abb. 1: Jahre mit den 10 höchsten Mittelwerten der Jahrestemperatur in Deutschland und in den KLIWA-Bundesländern seit 1881 (derselbe Mittelwert - mit * markiert – kann mehrmals auftreten).



Im Jahr **2012** gab es im Februar zunächst einen starken Frost, mit teilweise zugefrorenen Flüssen, in der ersten Monathälfte. In den KLIWA-Gebieten war nur der Neckar betroffen, der teilweise von der Schifffahrt nicht mehr befahrbar war. Es war der kälteste Februar seit 1986 [DWD Jahresrückblick 2012]. Im Gegensatz dazu erreichte Süddeutschland im August eine Hitzewelle, mit Tageshöchsttemperaturen von nahe 40 °C.

Das Jahr **2014** verlief sowohl in Deutschland, als auch in den KLIWA-Bundesländern erheblich zu warm. So war es nicht nur das wärmste Jahr in der Periode 2011 bis 2015, sondern sogar seit dem Beginn der regelmäßigen Temperaturmessungen 1881. Für das gesamte Deutschland lag die Durchschnittstemperatur des Jahres im Mittel bei 10,3 °C. Rheinland-Pfalz kam im Jahresdurchschnitt 2014 auf eine Temperatur von 10,7 °C und war damit das wärmste KLIWA-Bundesland, gefolgt von Baden-Württemberg mit 10,1 °C. Bayern war, aufgrund seiner geographischen Gegebenheiten, mit 9,6 °C das kühlsste Bundesland, sowohl im KLIWA-Vergleich als auch im Bundesdurchschnitt.

Mit 9,9 °C war das Jahr **2015** eines der zweitwärmsten Jahre in Deutschland seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1881, gemeinsam mit 2000 und 2007. Auch in Baden-Württemberg (9,9 °C), Bayern (9,4 °C) und Rheinland-Pfalz (10,2 °C) war das Jahr 2015 das zweitwärmste seit dem Beginn der Aufzeichnungen. Deutschlandweit waren zehn von 12 Monaten zu warm. November und Dezember waren zudem die wärmsten seit Beginn der Aufzeichnungen, der August der zweitwärmste seit Beginn der Aufzeichnungen. Im Sommer herrschte in Süddeutschland eine extreme Hitzeperiode, vor allem in den Monaten Juli und August. In Bayern wurde im unterfränkischen Kitzingen (Main) die höchste jemals in Deutschland gemessene Maximaltemperatur von 40,3 °C gleich zweimal erreicht (05.07.2015 und 07.08.2015). Auch in Baden-Württemberg stiegen die Temperaturen in Bad Mergentheim-Neunkirchen (Tauber Gebiet) auf 40,2 °C.

1.2 Niederschlag

Bei der Betrachtung des Niederschlags in diesem Kapitel können einerseits sehr hohe Niederschläge relevant sein, andererseits aber auch Trockenheit, also das Fehlen von Niederschlag. Während das Ausbleiben von Niederschlag gut messbar ist, sind im Vergleich dazu gerade Starkregenereignisse schwer erfassbar. Hohe, aber häufig sehr kleinräumige Niederschläge, die bei konvektiven Wetterlagen auftreten, werden in Abhängigkeit von der Dichte des Messnetzes entweder zufällig von einer Messstation registriert oder auch nicht. Dies ist bei der Betrachtung dieser Extremereignisse zu beachten. Zusätzliche flächenhafte Informationen kann hierbei die Messung des Niederschlags mit Hilfe von Radar liefern [RADOLAN 2009].

Starkregen

Von Starkregen wird im Allgemeinen gesprochen, wenn große Niederschlagsmengen in kurzer Zeit fallen. Er ist in der Regel kleinräumig, an hochreichende und intensive Konvektion gebunden und tritt häufig im Zusammenhang mit Gewittern auf. Der Zeitraum 2011 bis 2015 war geprägt durch eine Vielzahl von meist lokal begrenzten Starkregenereignissen in den KLIWA-Bundesländern. Extreme Dauerniederschläge Ende Mai/Anfang Juni 2013 führten zu Hochwasser in Süddeutschland (vgl. Kapitel 1.3). Untersuchungen zu dem Trendverhalten von Starkniederschlägen auf Tagesbasis finden sich in Kapitel 4.3. Im Folgenden wird beispielhaft eine Auswahl von extremen Niederschlagsereignissen der verschiedenen KLIWA-Länder seit 2011 dargestellt:

- Donnersbergkreis 20.09.2014 (Rheinland-Pfalz)

Extreme Niederschläge hatten am 20. September 2014 im Donnersbergkreis in Rheinland-Pfalz erhebliche Schäden angerichtet. An den in der Region liegenden Messstationen wurden maximal 30 mm Niederschlag in drei Stunden registriert. Damit ließen sich weder die Schäden erklären, noch die an den Pegeln gemessenen Abflüssen nachvollziehen. Mit Hilfe der RADOLAN-Daten des DWD's ließ sich eine Bewertung des Ereignisses vornehmen: Das Radarbild des Niederschlags zeigte, dass keine der Stationen im Zentrum der Gewitterzelle lag und somit den Niederschlag registrieren konnte. Gemäß der Radarauswertung fielen in dem Gebiet bis zu 140 mm Niederschlag in drei Stunden. Die Wiederkehrzeit des Niederschlagsereignisses entspricht in den Bereichen mit den höchsten Niederschlagssummen deutlich mehr als 100 Jahre (nach KOSTRA-DWD-2010).

- Bretten 06.06.2015, Bonndorf 14.06.2015 (Baden-Württemberg)

In Baden-Württemberg prägten zwei kurz hintereinander liegende Starkregenereignisse den Sommer 2015. Am Abend des 6. Juni 2015 entlud sich im Stadtgebiet Bretten eine eng begrenzte, stationäre Gewitterzelle mit extremen Niederschlägen und Hagel. Dabei fielen innerhalb von eineinhalb Stunden 100 mm Niederschlag, was ca. 13 % des mittleren Jahresniederschlags entsprach. Dieses Extremereignis hat eine statistische Wiederkehrzeit von weit über 100 Jahren (nach KOSTRA-DWD-2010). Das Ereignis führte zu gravierenden Schäden innerhalb des Ortes und zog lokal begrenzte Hochwasser nach sich. Nur acht Tage später am 16. Juni 2015 ereignete sich ein weiteres Unwetter in Baden-Württemberg im Gebiet der Stadt Bonndorf. Markant an diesem Ereignis war, dass der Hauptniederschlag von ca. 60 mm innerhalb einer halben Stunde fiel. Auch hier führte das Starkregenereignis zu schweren Schäden und Überschwemmungen.

- Oberstdorf 14.06.2015 (Bayern)

Am Nachmittag des 14. Juni 2015 trat in Südbayern in der Gemeinde Oberstdorf ein extremes Starkregenereignis auf. Innerhalb von knapp einer Stunde fielen an den Messstationen im Ort über 60 mm Niederschlag. Gemäß Radarauswertungen betrug der Niederschlag sogar ca. 88 mm in 45 Minuten, was deutlich über einem 100-jährlichen Niederschlagsereignis nach KOSTRA-DWD-2010 liegt. Die extremen Regenfälle führten zu Hochwasser an zwei Bächen in Oberstdorf, das zu erheblichen Schäden im Ort führte. Durch die Regenmassen wurde eine Mure oberhalb von Oberstdorf ausgelöst, die sich sehr schnell Richtung Tal bewegte. In einer Schlammlawine wurden Erd- und Geröllmassen bis in den Ortskern transportiert, mehrere Häuser wurden teilweise stark beschädigt.



Starkregenereignisse 2016

Der betrachtete Zeitraum des vorliegenden Monitoringberichtes reicht nur bis 10/2015, auf Grund der Aktualität der Starkregenereignisse im Mai/Juni 2016 sollen diese dennoch nicht unerwähnt bleiben.

Mit rund 115 mm Niederschlag erreichte der Juni 2016 134 % 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 190 % (Baden-Württemberg 130 %, Bayern 150 %) übertroffen. Die Niederschlagsschwerpunkte fielen lokal sehr extrem aus und führten zu Hochwasser mit schweren Überschwemmungen. Im Folgenden sind beispielhaft Extremereignisse aus den Bundesländern genannt:

In **Baden-Württemberg** fielen am 25. Mai 2016 während eines Schwergewitters in der Region um Ochsenhausen, bei Memmingen, innerhalb kürzester Zeit 91,3 mm Niederschlag und führten zu Überschwemmungen. Beim Ereignis in Braunsbach am 29. Mai 2016 fielen im Einzugsgebiet mehrerer kleinerer Bäche in einer Stunde mehr als 90 mm Niederschlag. Das dadurch verursachte Hochwasser richtete enorme Schäden an, insbesondere durch Geröll und Gestein sowie mitgeführte Baumstämme.

In **Bayern** kam es im Mai und Juni 2016 zu einer Reihe von Starkregenereignissen. Beispielhaft sind hier die Ereignisse im Raum Ansbach am 29./30. Mai 2016 sowie im Raum Rottal-Inn am 01./02. Juni 2016 genannt. Während eines Starkregenereignisses fielen am späten Nachmittag des 29. Mai 2016 in Nordbayern, im Raum Ansbach ca. 50 mm Niederschlag innerhalb von sechs Stunden. Schlammlawinen waren die Folge, die Flüsse Fränkische Rezat und Zenn traten teilweise über die Ufer, mit den entsprechenden Schäden in den betroffenen Ortschaften. Gewittrige Dauerregen sorgten in Bayern auch am 1. und 2. Juni 2016 im Landkreis Rottal-Inn für extreme Überschwemmungen; innerhalb 48 Stunden fielen örtlich über 180 mm Niederschlag. Auch hier waren besonders kleine Gewässer betroffen (Simbach); die resultierenden Hochwasser lagen in vielen Bereichen weit über hundertjährigen Ereignissen.

In **Rheinland-Pfalz** kam es im Zeitraum Mai bis Juni 2016 zu mehreren Starkregenereignissen, die trotz relativ trockener Böden zu Beginn, lokal erhebliche Sturzfluten, insbesondere im Hunsrück und in der Eifel aber auch in der Pfalz, ausgelöst haben. Ursächlich waren insbesondere die hohe Intensität und die Summe der Niederschläge von bis zu 115 mm binnen zwei Stunden. Insbesondere sind die Starkregen am 28. Mai 2016 im Ortsteil Morlautern (Stadt Kaiserslautern), am 4. Juni 2016 in der Gemeinde Grafschaft (Kreis Ahrweiler), am 7. Juni 2016 in der Gemeinde Kirchweiler (Kreis Vulkaneifel) und am 24. Juni 2016 in der Gemeinde Stromberg (Hunsrückkreis) zu nennen. In mehreren Gemeinden entsprach die gefallene Niederschlagssumme einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren oder mehr (nach KOSTRA-DWD-2010). Die Summe der lokal gleichzeitig auftretenden Unwetter mit hohen Niederschlagssummen führte auch zu mehreren Hochwasserwellen vor allem in kleineren Gewässern, aber auch zu einem Jahrhunderthochwasser in der Ahr. Der Oberrhein führte für die Jahreszeit außergewöhnlich viel Wasser, die Wasserstände befanden sich über den gesamten Monat Juni 2016 im Bereich der Hochwasser-Meldehöhen, überstiegen jedoch nicht ein fünfjähriges Ereignis.

Trockenheit

Neben verschiedenen Starkregenereignissen traten auch sehr trockene Perioden mit wenig Niederschlag auf. Besonders das Jahr 2015 sticht hier als Extremjahr heraus. Das gesamte KLIWA- Gebiet war von starker Trockenheit ab Februar betroffen. Nach einem relativ feuchten Januar, herrschte seit Februar vor allem in der Mitte und im Osten Deutschlands ein Niederschlagsdefizit, das im Sommer auch den Süden Deutschlands erfasste und mit kurzen Unterbrechungen bis zum Jahresende andauerte. Im Deutschlandmittel fielen im Jahr 2015 etwa 10 % zu wenig Niederschlag, in den KLIWA-Bundesländern betrug das Niederschlagsdefizit im Durchschnitt ca. 23 % (Abb. 2). In den meisten KLIWA-Bundesländern waren neun Monate in Folge zu trocken. In Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz fielen ca. 24 % zu wenig Niederschlag, in Bayern ca. 21 %.

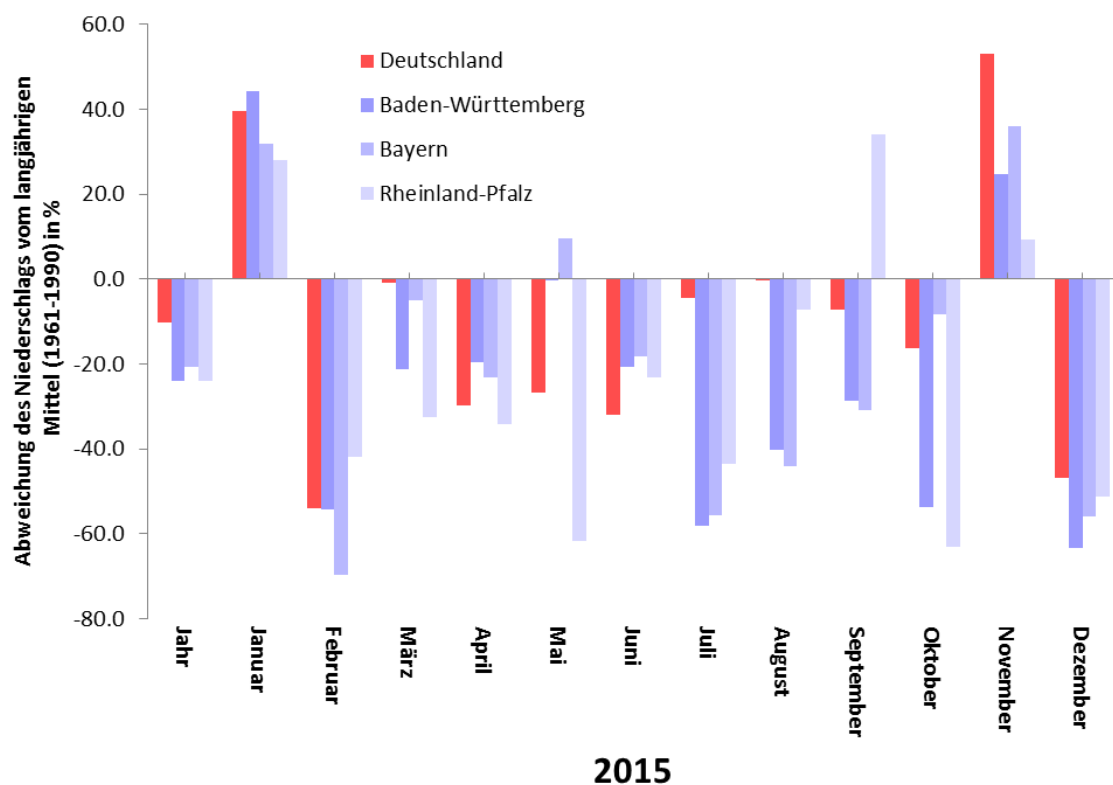


Abb. 2: Prozentuale Abweichung des Niederschlags vom langjährigen Mittel der Referenzperiode 1961–1990 für Deutschland und die KLIWA-Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz.

1.3 Hochwasser

Trendaussagen zu dem Langzeitverhalten von Hochwasserabflüssen finden sich in Kapitel 6. Im Folgenden werden extreme Hochwasserereignisse der Periode 2011–2015 betrachtet. Neben einer Vielzahl an kleinen Hochwasserereignissen ist das Hochwasserereignis im Mai/Juni 2013 besonders markant. In allen KLIWA-Bundesländern war bereits der Mai ein relativ kühler und niederschlagsreicher Monat. Zum Ende des Monats setzte großräumig Starkniederschlag ein, der, wegen einer flächendeckenden Sättigung des Bodens, zu extremen Hochwasserabflüssen mit Überschwemmungen führte, die sich sehr schnell entwickelten und ausbreiten konnten. Insbesondere im Zeitraum vom 30. Mai bis 5. Juni 2013 erreichten die Wasserstände vielerorts neue Rekordmarken.



In **Baden-Württemberg** führten die extremen Niederschläge in fast allen Flüssen zu einem raschen und starken Anstieg der Wasserstände. Betroffen waren besonders das Neckar- und Taubergebiet, einige Donau- und Oberrheinzuflüsse, das Baden-Württembergische Allgäu sowie der Hoch- und Oberrhein. An rund 30% der Pegel hatte sich ein über 10-jährliches Hochwasser ausgebildet, an rund 10% der Pegel ein über 50-jährliches. An einigen Neckar- und Donauzuflüssen wurde ein mehr als 100-jährliches Hochwasser erreicht. Man kann von einem flächendeckenden Ereignis sprechen, welches in ähnlichem Ausmaß im Mai 1978 aufgetreten war.

In **Bayern** konzentrierte sich das Hochwassergeschehen zunächst auf das Maingebiet und die nördlichen Donauzuflüsse, später verlagerte sich der Schwerpunkt auf die Donau und deren südlichen Zuflüsse. Im Maingebiet lief überwiegend ein 2- bis 10-jährliches Hochwasser ab. Im Donauegebiet, vor allem in Ober- und Niederbayern, traten Jährlichkeiten von 100 Jahren und mehr auf. In Passau wurde am Abend des 3. Juni am Pegel Passau/Donau ein neuer Rekordpegel von beinahe 13 m gemessen, rund 70 cm höher als beim Donauhochwasser 1954 (circa 12,20 m), dem größten Donauhochwasser des 20. Jahrhunderts. Das abgelaufene Hochwasser war ein extremes Ereignis hinsichtlich seiner räumlichen Ausdehnung und seines außergewöhnlich hohen Abflussscheitels. Stellenweise wurden die bisher beobachteten höchsten Hochwasserabflüsse überschritten und auch die Bemessungsabflüsse von Hochwasser-Schutzsystemen erreicht, wie zum Beispiel im Raum Deggendorf. Hier führte ein Deichbruch zu großflächigen Überflutungen. Die drei Hauptverkehrsträger Schifffahrt, Bahnverkehr und Straßenverkehr waren sehr stark beeinträchtigt.

In **Rheinland-Pfalz** war vor allem der Oberrhein vom Hochwasser 2013 betroffen. Am Pegel Maxau wurde am 2. Juni gegen Mittag ein maximaler Wasserstand von 8,69 m erreicht, die Schifffahrt wurde weiträumig eingestellt. Dieser Wasserstand markierte einen der höchsten gemessenen Wasserstände am Pegel Maxau. An weiter nördlich gelegenen Rheinpegeln im Oberrhein bis in den südlichen Mittelrhein wurden 10- bis 20-jährliche Hochwasser gemessen. Aufgrund des Einsatzes von Retentionsmaßnahmen am Oberrhein wurden die Scheitel deutlich reduziert. Wegen des geringen Moselzuflusses erreichten die Scheitelwasserstände im nördlichen Mittelrhein und im Niederrhein nur Scheitelwerte im Bereich eines mittleren Hochwassers.

1.4 Niedrigwasser

Ein Niedrigwasserereignis äußert sich in geringen Abflüssen, geringen Wasserständen der Flüsse sowie Seen oder des Grundwassers, mit der Folge von Trockenheit. Damit sind die Gewässerökosysteme ebenso wie die wasserwirtschaftlichen Bereiche in vielfältiger Weise betroffen. Aussagen über das Langzeitverhalten von Niedrigwasserabflüssen finden sich in Kapitel 7, die Trendentwicklung im Grundwasserbereich ist in Kapitel 9 dargestellt. Im Folgenden werden extreme Niedrigwasserperioden im Zeitraum 2011–2015 betrachtet:

Niedrigwasser 2011

Auf Grund einer ungewöhnlich stabilen Wetterlage fiel in den KLIWA-Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg ab dem 20. Oktober 2011 bis Ende November nahezu kein Niederschlag. In Bayern betrug daher die Abweichung des Niederschlags im November zum Monatsmittel 1961 bis 1990 nahezu –100 %. Die Auswirkungen für die Fließgewässer waren deutlich. In Baden-Württemberg sank der Wasserstand an rund 47 % der landesweiten Pegeln in den unteren Niedrigwasserbereich. In Bayern wiesen Ende November 22 % der Pegel Abflüsse unter dem Mittleren Niedrigwasser (MNQ) auf.

Niedrigwasser 2015

Die ganzjährige Trockenheit verbunden mit hohen Temperaturen (Kapitel 1.1) und geringem Niederschlag (Kapitel 1.2) führte im Jahr 2015 in den KLIWA-Bundesländern Baden-Württemberg und Bayern zu einer ausgeprägten Niedrigwasserperiode.

In **Baden-Württemberg** lagen Anfang August die Wasserstände bzw. Abflüsse in rund 40 % der Pegel im unteren Niedrigwasserbereich, das heißt, die Wasserstände waren tiefer als der niedrigste Wasserstand bzw. Abfluss in einem durchschnittlichen Jahr (Auswertzeitraum 1981 bis 2010). Insbesondere waren kleinere und mittlere Zuflüsse zum Oberrhein sowie kleinere Zuflüsse zum Neckar betroffen. Das Donau- und Bodensee-Einzugsgebiet war vom Niedrigwasser hingegen kaum betroffen. Lediglich im äußersten Südosten des Landes wurden an wenigen Pegeln Wasserstände unterhalb des mittleren jährlichen Niedrigwasserwertes (MNQ) gemessen. In den größeren Flüssen des Landes (Hoch- und Oberrhein, Donau, Neckar) sowie im Bodensee lagen die Wasserstände oberhalb des MNQ.

In **Bayern** führte die langandauernde Trockenheit zu einer Niedrigwasserperiode, besonders betroffen waren die Gebiete nördlich der Donau. Sie zählt zu den bedeutendsten Niedrigwasserereignissen der letzten 40 Jahre. In der Hitzeperiode zwischen Anfang Juli und Ende August 2015 wiesen nahezu 69 %, teilweise sogar bis zu 87 % der Pegel in Bayern niedrige oder sehr niedrige Werte auf (kleiner als 75 % der aktuellen Monatswerte bzw. kleiner als MNQ). Vor allem an den Pegeln nördlich der Donau war der langjährige mittlere Niedrigwasserabfluss (MNQ) nahezu flächendeckend unterschritten. Besonders betroffen waren die Seen im Südosten Bayerns, an denen Mitte August niedrige bis sehr niedrige Wasserstände registriert wurden. Ebenso ausgeprägt zeigt sich die Niedrigwasserperiode in den Grundwasserständen, die ab Juli bis zum Ende des Jahres 2015 zu niedrige Werte aufwiesen. Im Sommer wurden zudem, an den Wassertemperaturmessstellen in ganz Bayern verbreitet, neue Höchstwerte erfasst. Das Niedrigwasserereignis 2015 hatte eine Vielzahl von Auswirkungen auf die Gewässerökosysteme sowie die wasserwirtschaftlichen Bereiche. So führte die Niedrigwasserperiode 2015 zum Beispiel zu vereinzeltem Trockenfallen von kleineren Fließgewässern mit negativen Folgen für die Gewässerbiologie, zu Einschränkungen bei der landwirtschaftlichen Bewässerung und zu Fahrverboten für die Schifffahrt mit entsprechenden wirtschaftlichen Auswirkungen.



2 Klimamonitoring im Rahmen der KLIWA-Kooperation

Der Klimawandel ist kein Phänomen der Zukunft, sondern wir leben bereits mit ihm. Seine Auswirkungen sind auch in Süddeutschland spürbar. Durch langfristige Änderungen der meteorologischen Kenngrößen ist auch der Wasserhaushalt und davon abhängig die Wasserwirtschaft auf vielfältige Weise betroffen. Um daher die überregionalen Auswirkungen des Klimawandels gezielt für Süddeutschland zu erfassen, haben bereits im Jahr 1999 die Länder Baden-Württemberg und Bayern zusammen mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) das Kooperationsvorhaben „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA) für eine langfristige gebiets- und fachübergreifende Zusammenarbeit vereinbart. Seit 2007 ist an dieser Kooperation auch das Land Rheinland-Pfalz beteiligt.

Im Rahmen von KLIWA ist als ein wichtiger Projektbereich die (retrospektive) Untersuchung des Langzeitverhaltens hydro(meteoro)logischer Messzeitreihen vorgesehen (vgl. Abb. 3), um sich bereits abzeichnende Klimaänderungssignale zu detektieren. Erste Auswertungen zu den Messgrößen Lufttemperatur, Niederschlag und Abfluss wurden in den ersten Jahren in KLIWA durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in der Reihe „KLIWA-Berichte“ veröffentlicht. Allerdings konnten dabei zunächst nur die Messzeitreihen bis spätestens 2000 berücksichtigt werden. Die Ergebnisse unter Berücksichtigung einer Verlängerung der Messreihen bis 2005 wurden in einem ersten Monitoringbericht [KLIWA 2008] dargestellt. Dieser wurde im Jahr 2011 mit einer Verlängerung der Messreihe bis 2010 fortgeschrieben [KLIWA 2011], erstmals auch mit dem KLIWA-Partner Rheinland-Pfalz. Nun liegen die Ergebnisse der weiteren Verlängerung der Messreihen bis 2015 vor. Die wesentlichen Auswertungsergebnisse der bis 2015 verlängerten Zeitreihen, ergänzt durch Auswertungen der mittleren Abflüsse, sind in diesem Monitoringbericht 2016 im Sinne eines Klimamonitorings dargestellt.

Das Monitoring zum Klimawandel in Süddeutschland, das auf ein integriertes Messnetz KLIWA aufsetzt (Messstationen des DWD und der Länder), ist ein eigener Projektbereich in KLIWA (Abb. 3). Damit ist ein langfristig angelegtes, einheitliches Vorgehen beabsichtigt, durch das die relevanten hydrometeorologischen und hydrologischen Kenngrößen in ihrer zeitlichen Entwicklung erfasst und in regelmäßigen Abständen zeitnah ausgewertet werden sollen. Mit dem Monitoring sollen aktuelle Veränderungen des regionalen Klimas und Wasserhaushalts im Vergleich zu den bisherigen Langzeituntersuchungen und Klimaszenarienrechnungen zeitnah verfolgt, fortgeführt und bewertet werden. Informationen zum Klima von Deutschland und Europa publiziert der DWD in seinem jährlichen Klimastatusbericht.

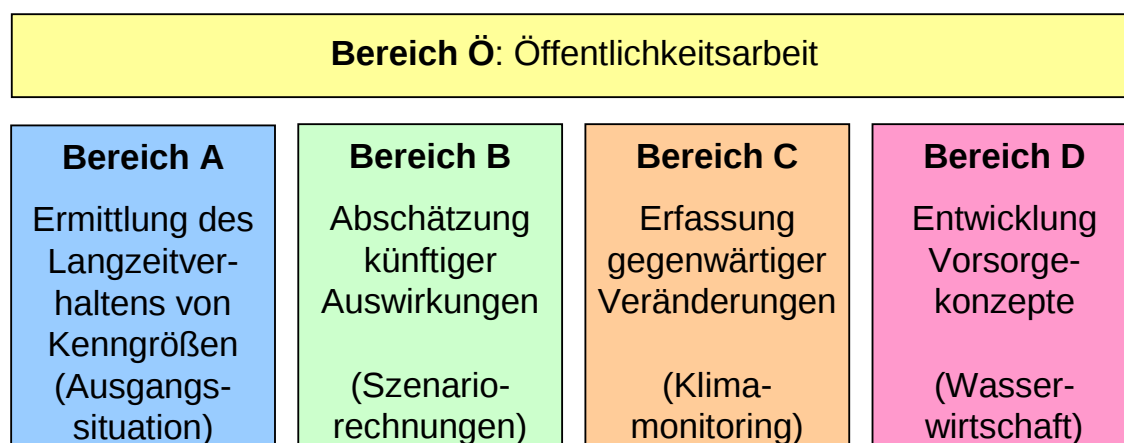


Abb. 3: Struktur der KLIWA-Projektbereiche.

3 Methodisches Vorgehen

Grundlage des Klimamonitorings in KLIWA ist eine regelmäßige Fortschreibung der Zeitreihenanalysen ausgewählter Kenngrößen mit hoher Datenqualität. Die Auswertungen sollen zeitnah zeigen, wie sich die Trends in den Messzeitreihen als mögliche Klimaänderungssignale entwickelt haben. Damit liegt gleichzeitig auch eine bestmögliche Datenbasis vor, um die Ergebnisse von Klimaszenarienrechnungen im Vergleich mit den gemessenen Klimagrößen besser beurteilen zu können. Dies stellt eine wichtige Entscheidungsgrundlage für die Erarbeitung von wasserwirtschaftlichen Handlungsempfehlungen dar.

Es liegen bisher in KLIWA bereits umfangreiche Untersuchungsergebnisse zum Langzeitverhalten für die nachstehenden, den Wasserhaushalt beeinflussenden Kenngrößen vor:

Für die Meteorologie: Gebietsniederschlag – Starkniederschlag – Lufttemperatur – Verdunstung – Globalstrahlung – Schneedecke

Für die Hydrologie: Mittlere Abflüsse – Hochwasserabflüssen – Grundwasserständen/Quellschüttungen – chemische/physikalische Langzeitdaten des Bodensees

Diese bisherigen Ergebnisse sind ausführlich in einer Reihe von KLIWA-Berichten [KLIWA-Hefte 2, 3, 5, 6, 7, 8, 11, 12 und 16] veröffentlicht und stellen die Basisauswertungen für die jeweilige Fortführung dar, mit Ausnahme der Schneedecke, der Globalstrahlung und der Verdunstung. Diese erfolgte zum ersten Mal in einem Monitoringbericht [KLIWA 2008] für den Zeitraum 1931 bis 2005, der im Jahr 2011 für den Zeitraum 1931 bis 2010 fortgeschrieben wurde [KLIWA 2011]. Im Rahmen des vorliegenden dritten Monitoringberichtes (Monitoringbericht 2016) sind die Ergebnisse der fortgeschriebenen Zeitreihenanalyse der Kenngrößen Lufttemperatur, Niederschlag, Hochwasserabflüsse, Niedrigwasserabflüsse, Grundwasserstände und des Bodensees dargestellt. Für diese werden somit die vorhandenen Langzeituntersuchungen bis 2015 ausgedehnt. Gegenüber dem zweiten Monitoringbericht werden zudem erstmals Kenngrößen des mittleren Abflusses sowie außergewöhnliche und extreme Ereignisse der Jahre 2011 bis 2015 betrachtet.

Für eine Kurzdarstellung waren folgende Aspekte wesentlich:

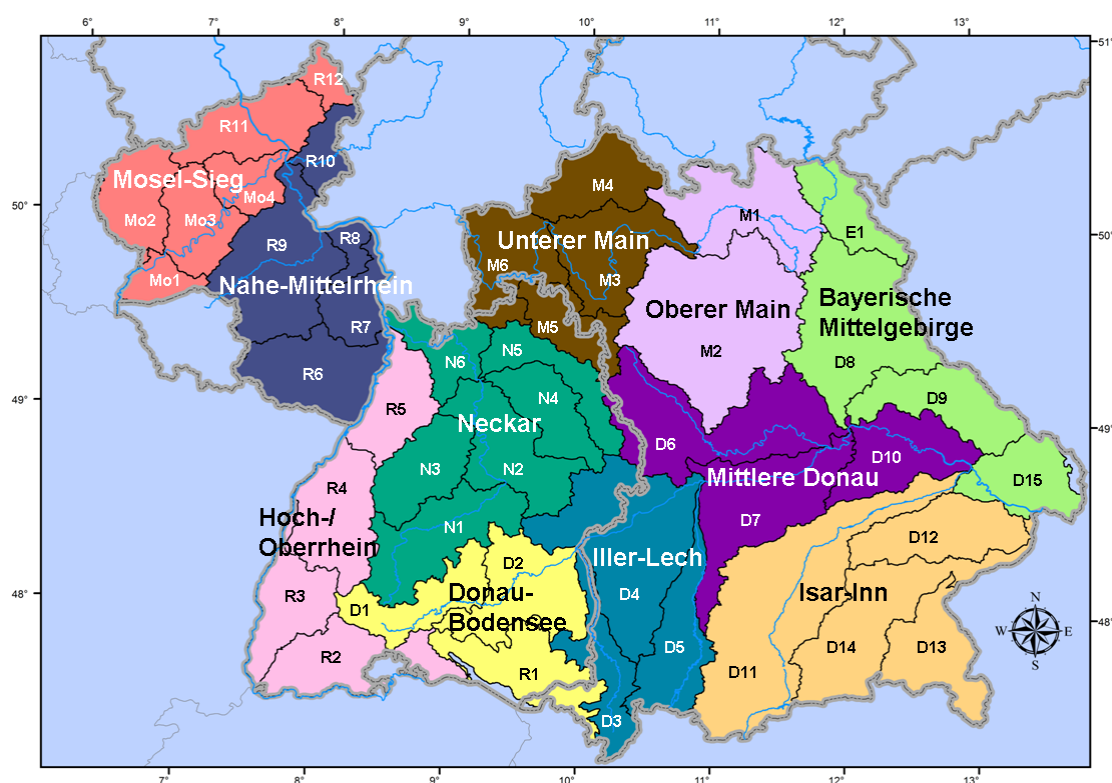
Da sich dieser Bericht als Fortführung des Klimamonitorings versteht, wurde auf eine konsistente Auswertung und Darstellung gegenüber dem ersten Monitoringberichtes geachtet. Für die betrachteten hydrometeorologischen Größen ist es sinnvoll, schwerpunktmäßig die aus Messstationen abgeleiteten Gebietswerte zu betrachten. Für die Auswertung und Darstellung der Gebietsmittelwerte werden abhängig von der betrachteten Kenngröße die 11 KLIWA-Regionen oder die 44 KLIWA-Untersuchungsgebiete gewählt, die nach den verschiedenen Flussgebieten Süddeutschlands festgelegt wurden und bisher Grundlage verschiedener Datenanalysen waren (siehe Abb. 4). Die hydrologischen Kenngrößen werden für das gesamte KLIWA-Untersuchungsgebiet zusammengefasst.

Die ausgewählten Kenngrößen stehen als Jahresserien zur Verfügung. Alle berücksichtigten meteorologischen Datenserien haben eine Zeitreihenlänge von 1931 bis 2015; für die hydrologischen Winterhalbjahre wurde deshalb die Periode 1932 bis 2015, für die hydrologischen Sommerhalbjahre die Periode 1931 bis 2015 ausgewertet. Dieser Unterschied um ein Jahr wird im Folgenden nicht weiter berücksichtigt und es wird in der Regel die Bezeichnung von 1931 bis 2015 verwendet. Die betrachteten Zeiträume für die hydrologischen Kenngrößen und deren Verfügbarkeit sind bei den jeweiligen Kapiteln beschrieben.

Für die Untersuchungen wurden die bisherigen Methoden der Zeitreihenanalyse, d. h. die lineare Trendanalyse und die Bestimmung der Trendsignifikanz mit dem Testverfahren nach



Mann-Kendall angewandt. Die statistische Signifikanz ermöglicht Aussagen, wie zuverlässig oder unsicher ein ermittelter Trend ist. Also ob eine Änderung überwiegend zufällig durch die natürliche Variabilität der Werte hervorgerufen wird, oder ob auch eine tatsächliche Veränderung (Trend) der jeweiligen Messgröße vorliegt, sozusagen signifikant ist. Für diese Veränderungen wird wegen der großen natürlichen Schwankungsbreite der Kennwerte jeweils der lineare Trend in der Zeitreihe herausgestellt. Zusätzlich ist teilweise das gleitende Mittel über 10 Jahre dargestellt, um die kurzfristigen Schwankungen aus der Zeitreihe zu nehmen. Dabei ist zu beachten, dass der Filter für das gleitende Mittel am Anfang und Ende der Zeitreihe mit weniger Jahren ausläuft. Die Trendgröße selbst ist - abhängig von der jeweiligen betrachteten Kenngröße - entweder als absoluter oder als relativer Wert angegeben. Eine Veränderung der Trends aufgrund der erweiterten Zeitreihenlänge bis 2015 wird im Vergleich zu dem Zeitraum bis 2000 bzw. 2010 betrachtet.



Untersuchungsgebiete:

D Donau

- D 1 Quelle bis Lauchert
- D 2 Donau, uh. Lauchert bis oh. Iller
- D 3 Iller
- D 4 Donau, uh. Iller bis oh. Wörnitz u. Lech
- D 5 Lech
- D 6 Wörnitz, Altmühl u. Schw. Laber
- D 7 Donau, uh. Lech bis oh. Naab
- D 8 Naab
- D 9 Regen
- D 10 Donau, uh. Naab bis oh. Isar
- D 11 Isar
- D 12 Vils und Rott
- D 13 Alz und Salzach
- D 14 Inn
- D 15 Donau, uh. Isar bis Landesgrenzen

N Neckar

- N 1 Quelle bis oh. Fils
 - N 2 Neckar u. Fils bis oh. Kocher (ohne Enz)
 - N 3 Enz
 - N 4 Kocher
 - N 5 Jagst
 - N 6 Neckar, uh. Jagst bis Mündung
- ##### R Rhein
- R 1 Bodensee
 - R 2 Rhein, uh. Bodensee bis Wiese
 - R 3 Rhein, uh. Wiese bis oh. Kinzig
 - R 4 Rhein und Kinzig bis Murg
 - R 5 Rhein, uh. Murg bis oh. Neckar
 - R 6 Rhein und Schwarzbach
 - R 7 Rhein, Isenach bis Nahe (ohne Selz)
 - R 8 Selz
 - R 9 Rhein und Nahe bis zur Lahn
 - R 10 Lahn, Grenze zu Hessen bis zur Mündung
 - R 11 Ahr, Wied und Nette
 - R 12 Sieg

E Elbe

- E 1 Sachs. Saale u. Eger

M Main

- M 1 Main bis oh. Regnitz
- M 2 Regnitz
- M 3 Main, uh. Regnitz bis oh. Fränk. Saale
- M 4 Fränkische Saale
- M 5 Tauber
- M 6 Main, uh. Fränk. Saale bis Landesgrenze

Mo Mosel

- Mo 1 Mosel rechtsseitig von der Grenze bis zur Ruwer
- Mo 2 Mosel linksseitig von der Grenze bis Kyll
- Mo 3 Mosel von der Dhron bis zum Alfbach
- Mo 4 Mosel bis zur Mündung

Abb. 4: Übersicht über die 44 KLIWA-Untersuchungsgebiete und die 11 KLIWA-Regionen.

4 Lufttemperatur

4.1 Bisherige Auswertungen

Das Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern wurde anhand von Gebietsmittelwerten für die im KLIWA-Projekt abgestimmten 33 Untersuchungsgebiete und die Zeitreihenlänge 1931 bis 2000 [KLIWA Heft 5] sowie 1931 bis 2005 [KLIWA 2008] untersucht. Ausgewertet wurde das Trendverhalten der Jahresmitteltemperaturen und der Monatsmitteltemperaturen, wodurch markante innerjährliche Unterschiede der Lufttemperaturänderungen aufgezeigt werden konnten. Seitdem wurde in fünfjährigem Abstand durch Monitoringberichte die Zeitreihen und Analysen fortgeschrieben, zuletzt im Monitoringbericht 2011 [KLIWA 2011]. Durch den Beitritt von Rheinland-Pfalz zu KLIWA im Jahr 2007 stieg die Anzahl der Regionen und Untersuchungsgebiete auf 11 bzw. 44.

Für den Zeitraum 1931 bis 2010 ist der süddeutsche Untersuchungsraum durch einen starken Anstieg der Lufttemperaturen seit Ende der achtziger Jahre des letzten Jahrhunderts gekennzeichnet. Die signifikante Zunahme der Jahresmitteltemperaturen resultiert im Wesentlichen aus einer flächendeckend zu verzeichnenden Zunahme der Lufttemperaturen im Jahresabschnitt Dezember bis März sowie im Mai, August und Oktober. Bei den übrigen Monaten (außer September) sind die regional unterschiedlichen Zunahmen in der Regel schwächer und weniger signifikant. Allein im September sind regional unterschiedliche Rückgänge der Lufttemperaturen zu verzeichnen, die kein Signifikanzniveau erreichen. Schwerpunkt der Temperaturzunahme bis 2010 gegenüber 1931 bis 2000 ist das Sommerhalbjahr. Im Langzeitverhalten seit 1931 ist jedoch weiterhin die Temperaturzunahme im Winterhalbjahr größer als die im Sommerhalbjahr, obwohl die Erwärmung in den letzten 10 Jahren im Sommerhalbjahr stärker als im Winterhalbjahr ausgefallen ist. Auch sind die Trends der Monatsmitteltemperatur des Dezembers trotz ihrer Abschwächung in den meisten Regionen weiterhin die stärksten im Jahr.

Im vorliegenden Monitoringbericht 2016 werden für Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz die Temperatur-Zeitreihen 1931 bis 2015 ausgewertet. Um direkte Aussagen über eine Veränderung der beobachteten Trends machen zu können, werden zudem Trendvergleiche zwischen den zwei 70-jährigen Zeiträumen 1931–2000 und 1946–2015 vorgenommen.

4.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung

Durch Verlängerung der Untersuchungsperiode bis einschließlich 2015 wird die weitere Trendentwicklung der Lufttemperaturen im süddeutschen Untersuchungsraum bewertet. Von großem Interesse ist beispielsweise, ob und in welchem Maße sich der globale Erwärmungstrend auch in Süddeutschland fortgesetzt hat [IPCC 2014].

Als Datengrundlage der Langzeituntersuchung dienen die Stationszeitreihen der täglichen Lufttemperatur von bis zu 200 über das Untersuchungsgebiet Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz verteilten Stationen des DWD-Messnetzes, deren Zeitreihen als ausreichend homogen und lang angesehen werden. Allerdings ist die verfügbare Stationszahl für die Jahre 1931 bis 1950 deutlich geringer (ca. 110), um 1991 jedoch mit 220 Stationen leicht höher. Vor der Berechnung von Gebietsmittelwerten werden die Messdaten regionalisiert [zur Methodik vgl. Müller-Westermeier 1995; Maier 2010]. Aufgrund des hohen Aufwandes des Anfangs in KLIWA verwendeten Verfahrens zur Regionalisierung der Lufttemperatur aus Tagesdaten [KLIWA Heft 5; KLIWA 2008] wird seit dem zweiten Monitoringbericht 2011 auf die routinemäßig erstellten Monatsrasterdaten der nationalen Klimaüberwachung im DWD zur Ermittlung der halbjährlichen und jährlichen Mittelwerte der Lufttemperaturen für die Trendanalysen zurückgegriffen. Vergleiche der beiden Auswertungen bis 2005 haben gezeigt, dass alle Aus-



sagen der vorherigen Auswertungen auch mit der neuen Datenbasis unverändert erhalten bleiben.

Die Änderungen der Lufttemperaturtrends sind flächendeckend weitgehend ähnlich. Die Darstellung und Beschreibung des Zeitreihenverlaufes bis 2015 und des Trendvergleiches der 70- bzw. 85-jährigen Zeitreihen erfolgt daher nachstehend nur für größere Flächeneinheiten, also die der 11 KLIWA-Regionen.

Neben der Darstellung der Trendauswertungen der untersuchten Zeitreihen gemäß früherer Untersuchungen in KLIWA werden die Ergebnisse auch als Ringdiagramme dargestellt. Mit den Ringdiagrammen ist es möglich, den Jahresgang der Trends monatsweise und quartalsweise in komprimierter Form zu präsentieren. Sie sind als Ergänzung zu den Flächendarstellungen gedacht, da sie zur Übersichtlichkeit keine Signifikanzdarstellung enthalten.

4.3 Neue Ergebnisse

Zeitreihen der Gebietsmittelwerte

In Abb. 5 sind die Mitteltemperaturen der letzten fünf Jahre und der Vergleich mit dem langjährigen Mittel 1961 bis 1990 (Referenzperiode der WMO) dargestellt. Die Mitteltemperaturen liegen zwischen 8,5 und 10,3 °C, die Abweichungen zu 1961 bis 1990 bei durchschnittlich +1,4 °C. Im Vergleich zu den fünf Jahren (2006 bis 2010) davor, ergibt sich demnach eine deutliche Zunahme von im Mittel +0,5 °C und mehr. Diese Zunahme der Lufttemperatur spiegelt sich deutlich in Abbildung 5 wieder.

In Abb. 6 sind beispielhaft die Zeitreihenverläufe der Jahresmitteltemperaturen für die Regionen Mosel-Sieg, Neckar und Isar-Inn dargestellt. Der Verlauf ist für alle 11 KLIWA-Regionen grundsätzlich ähnlich. Es zeigt sich über den 85-jährigen Zeitraum eine deutliche Zunahme der Lufttemperatur, wobei sich jedoch immer wieder wärmere Perioden mit etwas kälteren abwechseln. Diese Schwankungen werden durch großräumige atmosphärische Muster, wie die Nordatlantik-Oszillation (NAO), verursacht. Grundsätzlich zeigt sich in allen Regionen des Gesamtgebietes ein ähnlicher Verlauf der Gebietsmitteltemperaturen. Seit Ende 1980 hält die Periode der vorwiegend überdurchschnittlichen Jahresmitteltemperaturen weiterhin an. Dabei sind in den letzten 20 Jahren nur die Jahre 1996 und 2010 auffällig kühl, wobei die absoluten Minima in den Zeitreihen vor 1960 nie erreicht werden. 2014 wurden die absoluten Jahreshöchsttemperaturen in allen Regionen gemessen, dabei lagen die Temperaturen im Schnitt ca. +2 °C über dem langjährigen Mittel 1961 bis 1990. Seit 2001 lagen insgesamt 14 von 15 Jahren in allen 11 Regionen über dem langjährigen Mittel (1961–1990).

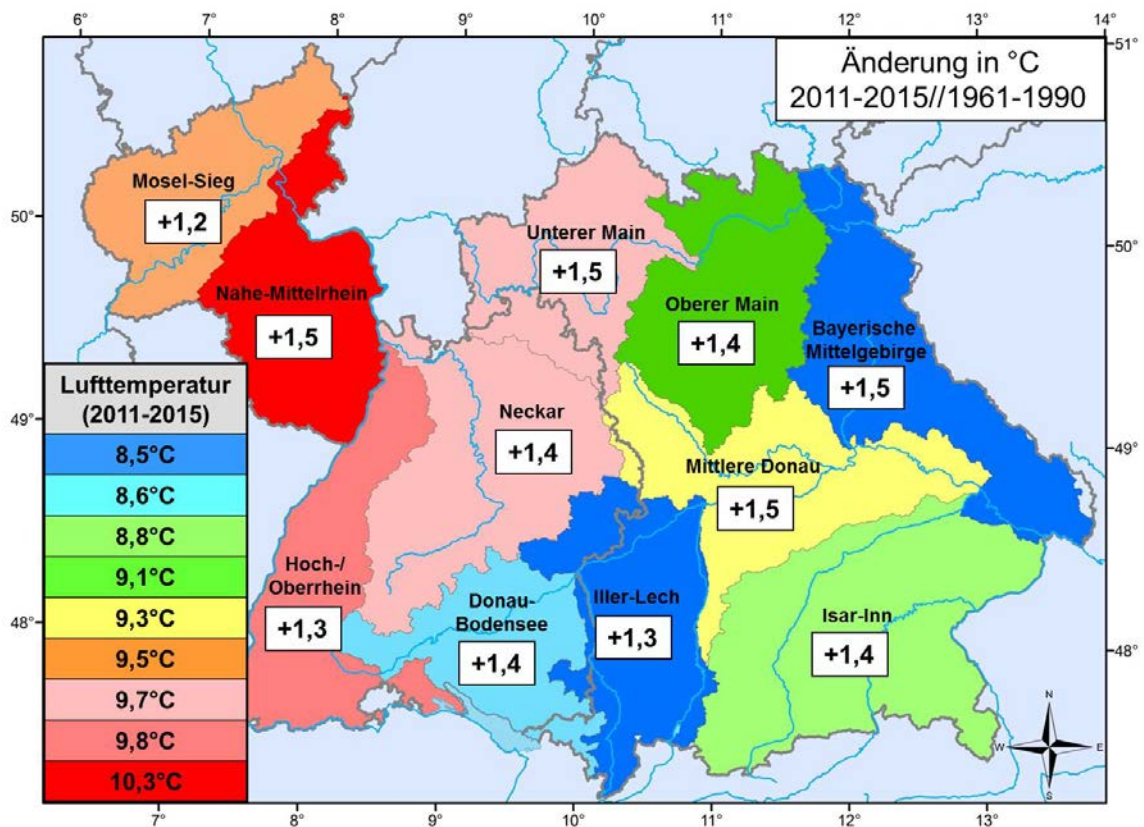


Abb. 5: Mittlere Lufttemperatur in °C im Zeitraum 2011-2015 (farbig) und die Abweichung vom Mittelwert 1961-1990 (Zahlen) für die KLIWA-Regionen.

In den hydrologischen Halbjahren (nicht dargestellt) sind generell ähnliche Verläufe mit positiven Trends in allen Regionen wie bei den Jahresmitteln zu sehen. Hierbei zeigt das hydrologische Winterhalbjahr stärkere positive Trends als das Jahresmittel, welches wiederum größere Trends als das Sommerhalbjahr aufweist. Außerdem ist für die Zeitreihen der Mitteltemperaturen des Winterhalbjahrs eine wesentlich höhere Variabilität im Vergleich zu den Jahres- und Sommerhalbjahreszeitreihen zu beobachten. Dabei zeigt sich, dass milde Winter auch schon in früheren Jahrzehnten wie z. B. 1947/48, 1960/61 oder 1974/75 zu finden sind. In den letzten zehn Jahren wurden diese Werte aber eindeutig durch den Winter 2007/2008 und 2013/2014 übertroffen. Winterhalbjahre mit unterdurchschnittlichen Lufttemperaturen wie 2005/2006 sind jedoch insgesamt seit 1990 wesentlich seltener geworden. Auch im vermeintlich kalten Winter 2012/2013 liegen nur wenige Regionen unter dem langjährigen Mittelwert (1961 –1990). Einzelne Monate waren im Winter wesentlich kälter als in den Jahren davor, dies trifft aber nicht auf das gesamte Halbjahr zu, da es im Frühjahr und Herbst jeweils auch sehr milde Monate gab. Weiterhin ist 1947 eines der wärmsten Sommerhalbjahre in der betrachteten Zeitreihe. Der Hitzesommer 2003 bleibt im gesamten Untersuchungszeitraum das Rekordjahr mit Ausnahme der Regionen Nahe-Mittelrhein und Mosel-Sieg. Für diese beiden Regionen der Rheinland-Pfalz war 2006 das wärmste Sommerhalbjahr. Die letzten fünf Sommerhalbjahre sind nicht besonders auffällig, wobei 2015 das wärmste Sommerhalbjahr war.

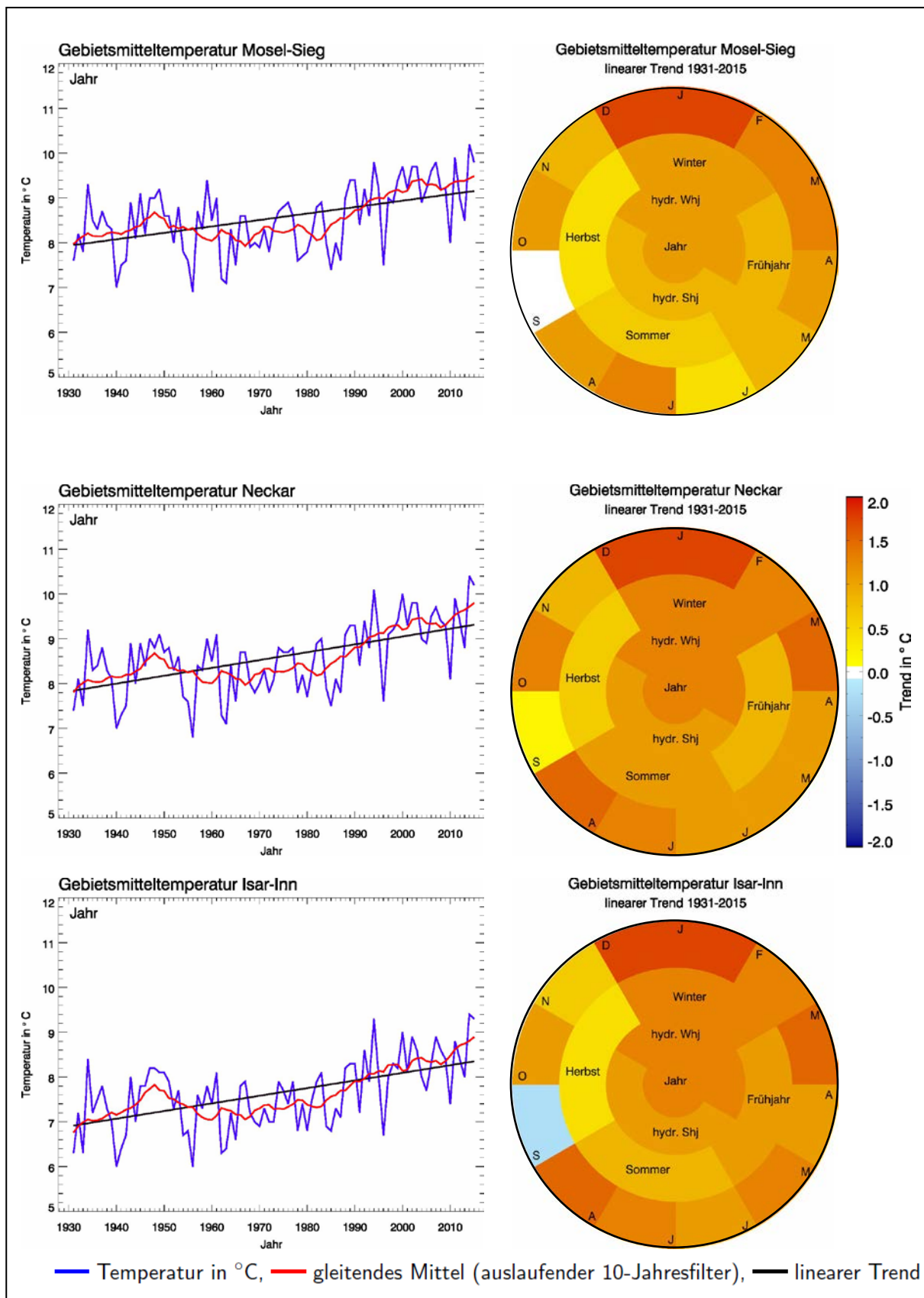


Abb. 6: Gebietsmitteltemperaturen in den Regionen Mosel-Sieg, Neckar und Isar-Inn; Zeitraum 1931–2015; Zeitreihen und Trends für die Jahresmitteltemperaturen sowie Ringdiagramme mit Trendangaben.

Trends der Gebietsmittelwerte

Für die 11 KLIWA-Regionen zeigt der lineare Trend der Jahresmitteltemperaturen eine signifikante Zunahme von 1,2 bis 1,5 °C/85 Jahre (siehe auch Beispielreihen in Abb. 6). Da für hydrologische Betrachtungen der Jahresverlauf wichtig ist, werden im Folgenden die hydrologischen Halbjahre genauer beschrieben:

Die **Winterhalbjahrestemperaturen** der Zeitreihe 1931 bis 2015 weisen in allen Regionen des Untersuchungsraumes einen hoch signifikanten positiven Trend auf (siehe Abb. 7). Das Winterhalbjahr weist mit Zunahmen zwischen +1,3 und +1,6 °C/85 Jahre im Vergleich stärkere, positive Trends als das Sommerhalbjahr und das Gesamtjahr auf. Zu beachten ist weiterhin, dass durch die Mittelung der Lufttemperaturen über den sechsmonatigen Jahresabschnitt, teilweise hydrologisch relevante Unterschiede im innerjährlichen Trendverhalten der Lufttemperaturen verwischt werden.

Die Ringdiagramme für drei beispielhafte Regionen in Abb. 6 zeigen die Verteilung der Veränderungen innerhalb der Monate und Quartale. Die Wintermonate Dezember und Januar weisen die stärksten positiven Trends auf, während die Monate November und April die geringsten Trends im Winterhalbjahr zeigen. Diese Veränderungen sind über den gesamten KLIWA-Raum grundsätzlich ähnlich, variieren aber leicht in der Stärke und auch teilweise bei der Verteilung in den Monaten.

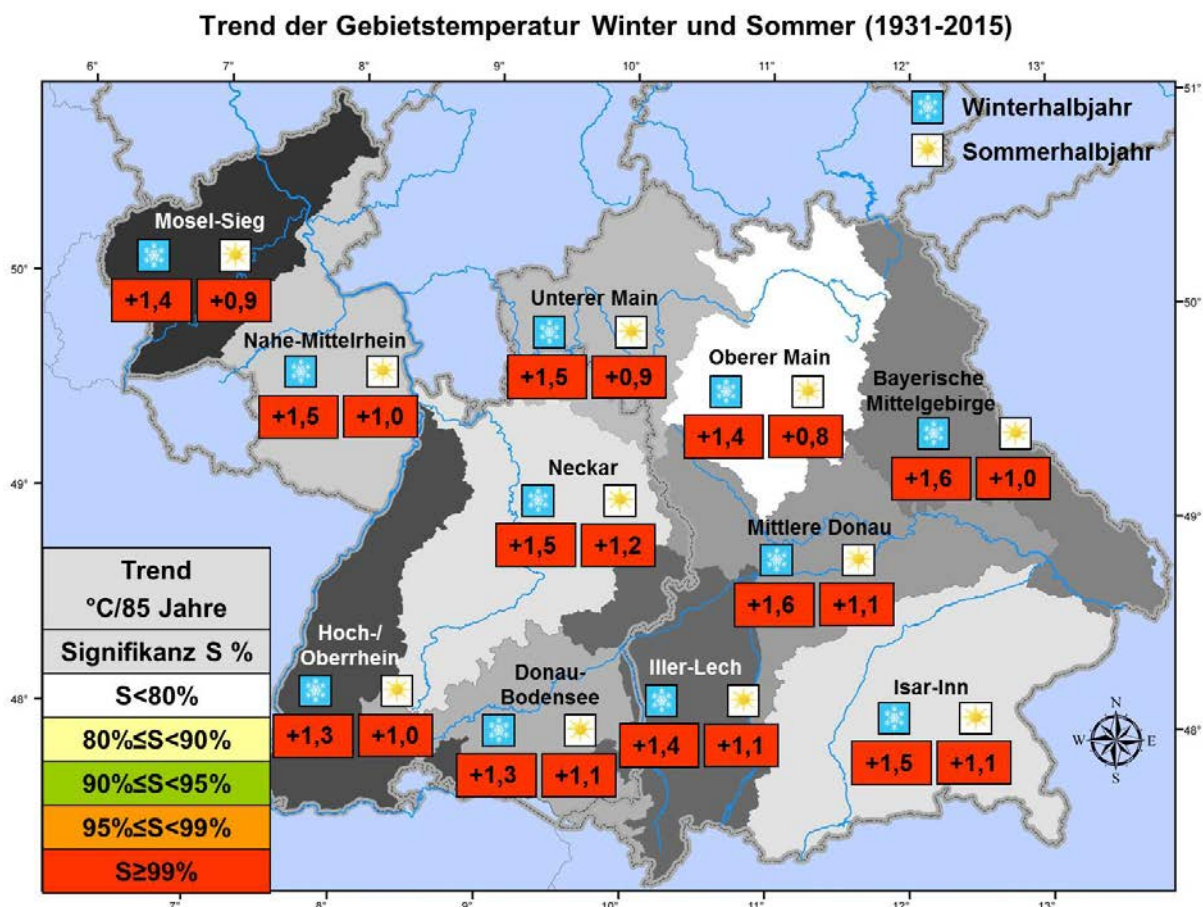


Abb. 7: Entwicklung der mittleren Lufttemperatur in den hydrologischen Halbjahren, Trend in °C/85 Jahre im Zeitraum 1931–2015.



Die **Sommerhalbjahrestemperaturen** der Zeitreihe 1931 bis 2015 weisen ähnlich dem Winterhalbjahr in allen Regionen einen positiven Trend auf, der allerdings insgesamt nicht so stark ausgeprägt ist wie im Winterhalbjahr (vgl. Abb. 7). Die Gebietstrends sind jedoch ebenfalls alle hoch signifikant und liegen zwischen $+0,8$ und $+1,2$ °C/85 Jahre.

Die Ringdiagramme für drei beispielhafte Regionen in Abb. 6 zeigen, dass der Monat September nicht in allen Regionen einen positiven Gesamttrend aufweist und in Folge die Trends für den Herbst und das Sommerhalbjahr abschwächt. Das Herbstquartal (September bis November) ist demzufolge in ganz Süddeutschland auch das Quartal mit dem geringsten Trend. Die stärksten positiven Trends finden sich im Sommerhalbjahr in der Regel im Juli und August.

Trendänderungen der Jahres- und Halbjahrestemperaturen

In Tabelle 1 sind die Trendwerte der Zeitreihe 1946 bis 2015 im Vergleich zu der ebenfalls 70-jährigen Referenzreihe 1931 bis 2000 für die jährlichen und halbjährlichen Gebietsmitteltemperaturen angegeben. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten wurde darauf geachtet, dass die Länge der betrachteten Zeitreihen identisch ist. Denn nur so lässt sich feststellen, ob sich ein Trend verstärkt und dessen Signifikanz zugenommen hat. Dabei stellt sich jedoch die Problematik der unterschiedlichen Startzeitpunkte 1931 und 1946 für die Trendberechnung. Weitere Untersuchungen zeigen jedoch, dass davon die grundlegenden Aussagen (Veränderungen in Trendrichtung und Signifikanz) nicht betroffen sind.

Für den Zeitreihenvergleich 1946 bis 2015 gegenüber 1931 bis 2000 ergibt sich in allen Regionen eine weitere Verstärkung des bisher schon positiven Trends, sowohl für das Jahr als auch die hydrologischen Halbjahre. Ebenso zeigt sich eine generelle Zunahme der Signifikanz der Trends für alle KLIWA-Regionen mit bis zum Jahre 2015 überwiegend hoch-signifikanten Trends. Einzige Ausnahme bildet die Region Iller-Lech, deren Signifikanz im hydrologischen Winterhalbjahr konstant bei 95 % bleibt, bei einem um $+0,3$ °C/70 Jahre stärkeren Trend.

Die weitere Zunahme der Jahresmitteltemperaturen resultiert aus Temperaturzunahmen sowohl im hydrologischen Winter- als auch Sommerhalbjahr, wobei die Trendveränderungen des Sommerhalbjahres mit maximal $+1$ °C/70 Jahre deutlich dominieren. Im Langzeitverhalten seit 1931 ist die Temperaturzunahme im Winterhalbjahr jedoch weiterhin größer als im Sommerhalbjahr. Mit den Jahren 2000 bis 2015 hat aber die Erwärmung im Sommerhalbjahr gegenüber dem Winterhalbjahr weiter aufgeholt. Weitere Auswertungen belegen zudem, dass die Stabilität der Trends in den letzten Jahren zugenommen hat.

Für die Erstellung des vorliegenden Berichtes wurden zunächst umfangreiche Auswertungen für die Lufttemperatur für die einzelnen KLIWA-Regionen (vgl. Abb. 4) durch den KLIWA-Partner DWD durchgeführt, die hier selbst nicht oder nur in stark zusammengefasster Form dargestellt werden konnten. Diese sind in Form einer Ergänzung zum Klimamonitoringbericht 2016 auf der Internetseite von KLIWA [www.kliwa.de] als „Monitoringbericht 2016 - Lufttemperatur - Zusätzliche Auswertungen für die KLIWA-Regionen“ zum Download verfügbar.

Tab. 1: Trends der Lufttemperatur Halbjahres- und Jahreswerte in °C/70 Jahre in den KLIWA-Regionen, Gebietsmittelwerte für die Zeiträume 1931–2000 und 1946–2015. Die Signifikanzniveaus sind durch unterschiedliche Schriftgrößen und –typen dargestellt.

		Trend der Lufttemperatur im Zeitraum 1931-2000 [°C/70 Jahre]			Trend der Lufttemperatur im Zeitraum 1946-2015 [°C/70 Jahre]		
Region	Höhe m ü. NN	Jahr	Winter- halbjahr	Sommer- halbjahr	Jahr	Winter- halbjahr	Sommer- halbjahr
Nahe-Mittelrhein	284	0,6	0,8	0,2	1,4	1,6	1,2
Unterer Main	319	0,6	0,8	0,2	1,2	1,5	1,0
Mosel-Sieg	356	0,6	0,7	0,3	1,3	1,4	1,1
Oberer Main	404	0,5	0,7	0,1	1,3	1,5	1,0
Neckar	428	0,8	1,0	0,5	1,4	1,5	1,4
Hoch- und Oberrhein	451	0,7	0,8	0,4	1,2	1,3	1,1
Mittlere Donau	452	0,8	1,0	0,5	1,5	1,6	1,3
Bayer. Mittelgebirge	535	0,6	0,9	0,2	1,4	1,5	1,2
Isar-Inn	639	0,8	1,0	0,5	1,3	1,4	1,2
Donau-Bodensee	653	0,7	0,8	0,5	1,2	1,2	1,2
Iller-Lech	674	0,8	0,9	0,5	1,2	1,2	1,2

Signifikanz S nach Mann-Kendall-Test: $S < 80\%$; $80\% \leq S < 90\%$; $90\% \leq S < 95\%$;
 $95\% \leq S < 99\%$; **$99\% \leq S < 99,9\%$** , **$S \geq 99,9\%$**

Beispiel Nahe-Mittelrhein: Der lineare Trend der Jahresmitteltemperaturen betrug im Zeitraum 1931 bis 2000 +0,6 °C, für den Zeitraum 1946 bis 2015 hingegen bereits +1,4 °C. Daraus ergibt sich, dass sich die Erwärmung in den letzten 15 Jahren weiter verstärkt hat und die Jahresmitteltemperatur im Durchschnitt deutlich zugenommen hat.



5 Niederschlag

5.1 Bisherige Auswertungen

Im KLIWA Heft 7 wurde erstmals das Langzeitverhalten des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg und Bayern im Zeitraum 1931 bis 1997 für die 33 KLIWA-Untersuchungsgebiete dargestellt. Das Langzeitverhalten der Starkniederschlagshöhen wurde stationsbezogen für den Zeitraum 1931 bzw. 1901 bis 2000 untersucht und im KLIWA Heft 8 veröffentlicht. Seitdem werden alle fünf Jahre die Auswertungen durch Monitoringberichte aktualisiert. Seit 2010 wurden die Auswertungen auf Rheinland-Pfalz und somit auf 44 Untersuchungsgebiete ausgedehnt. Der vorliegende Bericht enthält die Werte bis 2015.

Im Rahmen des Projektes Messnetz 2000 wurde seit 1998 im DWD eine umfangreiche Automatisierung des nebenamtlichen Messnetzes durchgeführt. Als Folge dieser Automatisierung wurde fast die Hälfte der nebenamtlichen Niederschlagsstationen, die nicht automatisiert werden konnten, aufgelöst. Damit hat sich die Datenbasis für eine stationsweise Auswertung der Starkniederschlagshöhen erheblich verringert. Deshalb werden die Starkniederschläge nur gebietsweise für die 44 KLIWA-Untersuchungsgebiete bzw. 11 KLIWA-Regionen ermittelt. Untersuchungen haben ergeben, dass der höchste Gebietsniederschlagswert einer Dauerstufe in einem Zeitraum (z. B. in den hydrologischen Halbjahren), die Starkniederschlagshöhen der Dauerstufe, gewonnen aus Stationswerten, gut repräsentiert.

Die bisherigen Untersuchungen für den Zeitraum 1931 bis 2010 ergaben, dass der mittlere Gebietsniederschlag im Winterhalbjahr für alle Untersuchungsgebiete einen positiven Trend mit regional hoher Signifikanz aufzeigt. Es sind Zunahmen von bis zu +25 % und mehr, insbesondere am Oberen Main, im Bayerischen Mittelgebirge sowie an der Donau zu finden. Insgesamt sind die positiven Trends und auch die Signifikanzen seit den ersten Auswertungen (1931–2000) leicht rückläufig. Die Trends des mittleren Gebietsniederschlags im Sommerhalbjahr sind hingegen überwiegend schwach negativ und besitzen keine Signifikanz. Seit den ersten Auswertungen ist allerdings eine Tendenz zu positiven Trends im Sommerhalbjahr zu bemerken.

Bei den Starkniederschlägen (hier: maximale eintägige Gebietsniederschläge im jeweiligen Bezugszeitraum) zeigen die Zeitreihen der halbjährlichen Tageshöchstwerte im Winterhalbjahr von 1931 bis 2010 fast überall positive Trendwerte, die im Nordosten Bayerns über +40 % erreichen. Die Signifikanz ist allerdings unterschiedlich und variiert räumlich sehr stark. Im Sommerhalbjahr sind die Trends uneinheitlich und überwiegend nicht signifikant. Die detektierte Zunahme der winterlichen Starkniederschläge blieb seit 2000 auf dem bisher festgestellten überwiegend hohen Niveau. Eine Bestätigung der vermuteten Zunahme von kleinräumigen und kurzzeitigen Starkniederschlägen hoher Intensität ist auf Basis der vorliegenden Auswertung nicht möglich.

5.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung

Ziel der jetzt durchgeführten Auswertungen ist es, die Untersuchungen zu beiden Aspekten des Niederschlagsverhaltens (mittlere Gebiets- und Starkniederschläge) bis zum Jahr 2015 auszuweiten. Dabei soll besonders auf die Veränderungen seit 2000 eingegangen werden.

Für den Zeitraum seit 1931 wurden alle verfügbaren Stationswerte nach einer sorgfältigen Prüfung mit Hilfe des REGNIE-Verfahrens auf ein ca. 1x1 km² Raster interpoliert, wobei die Messungen nicht um den systematischen Niederschlagsmessfehler korrigiert wurden. Aus den REGNIE-Rasterwerten wurden anschließend die täglichen Gebietswerte der 44 KLIWA-Untersuchungsgebiete berechnet. Sie bilden die Datenbasis für die Berechnung der mittleren Niederschlagshöhen im Jahr oder Halbjahr, sowie für die Bestimmung des höchsten ein- bzw.

fünftägigen Gebietswertes in den hydrologischen Halbjahren. Obwohl für die weiteren Untersuchungen nur der Gebietswert betrachtet wird, sollte nicht vergessen werden, dass sich dieser Wert in den einzelnen Jahren aus einer sehr unterschiedlichen Anzahl von echten Beobachtungen zusammensetzt. Besonders vor 1940 und in den Jahren 1944 und 1945 ist die Stationsanzahl deutlich geringer als nach 1950, wobei ab 1995 ebenfalls eine Abnahme der verfügbaren Stationen im KLIWA-Gebiet auf aktuell ca. 900 beginnt. Etwa die Hälfte der verfügbaren Stationen in Deutschland sind konventionelle und damit nicht automatisch meldende Stationen, deren Datenprüfung sehr aufwendig ist. Aus diesem Grund wurden für die Jahre 2011 bis 2015 tägliche REGNIE-Felder nur auf Basis der automatischen Stationen berechnet, da die übrigen Daten nicht qualitätsgeprüft vorlagen.

Die verhältnismäßig geringe Anzahl (<400) von Stationen vor 1951 im KLIWA-Gebiet wirkt sich zudem verstärkt auf die Erfassung der maximalen sommerlichen Gebietsniederschlagshöhen aus. Da im Sommer hohe Niederschläge meist bei konvektiven Wetterlagen auftreten, führt ein nicht so dichtes Messnetz dazu, dass diese kleinräumigen Niederschlagsereignisse entweder nicht erfasst werden und damit der Gebietsniederschlag zu gering ausfällt. Oder die kleinräumigen Ereignisse werden zufällig von einer Messstation erfasst, mit der Folge, dass sie ein stärkeres Gewicht im Gebietsniederschlag erhalten, als beim Vorhandensein eines dichteren Messnetzes. Generell spielt auch die Niederschlagsklimatologie in den verschiedenen Regionen eine Rolle. Besonders im unteren Donaugebiet werden hohe sommerliche Niederschlagshöhen oft von sogenannten Vb-Wetterlagen hervorgerufen. Sie erzeugen einen hohen flächenhaften Niederschlag, der auch von wenigen Stationen im Gebiet gut erfasst wird. Demgegenüber überwiegen im Neckargebiet zum Beispiel konvektive Niederschlagsereignisse. Im betrachteten Rheineinzugsgebiet kommt zusätzlich der Stau effekt des Schwarzwaldes hinzu. In Rheinland-Pfalz gibt es durch Rhein und Mosel sowie die Mittelgebirge Hunsrück, Westerwald, Eifel und Taunus lokale Effekte, welche die Niederschlagsmuster deutlich beeinflussen können. Insgesamt muss man festhalten, dass der maximale Sommerniederschlag damit deutlich ungenauer erfasst werden kann, als der winterliche Niederschlag. Entsprechend sind Trendaussagen, im speziellen beim Starkniederschlag, für das Sommerhalbjahr ungenauer als für das Winterhalbjahr.

5.3 Neue Ergebnisse

Mittlere Gebietsniederschlagshöhe

Die Zeitreihen des mittleren Gebietsniederschlages für das Winter- und Sommerhalbjahr im Zeitraum 1931 bis 2015 für die KLIWA-Regionen Mosel-Sieg, Neckar und Isar-Inn sind in Abb. 8 beispielhaft abgebildet. Die Zeitreihen sind von einer hohen Variabilität von Jahr zu Jahr geprägt. Zwischen Winter- und Sommerhalbjahr existieren vor allem in den flacheren Gebieten (Neckar und Mosel-Sieg) im Gegensatz zum alpennahen, stark gegliederten Gebiet (Isar-Inn) keine großen Unterschiede in der Höhe der Gebietsniederschläge der beiden Halbjahre. Die Trends der Zeitreihe von 1931 bis 2015 für die mittlere Gebietsniederschlagshöhe im hydrologischen **Winterhalbjahr** sind in Abb. 9 für die 44 KLIWA-Untersuchungsgebiete dargestellt. In allen KLIWA-Gebieten findet man zunehmende Trends, wobei deren Stärke mit +2 bis +22 % und auch deren Signifikanz unterschiedlich ausfallen. Die stärksten Trends (> 15 %), die auch hoch signifikant sind, liegen im Bereich Nord- und Mittelbayern. Weitere, weniger signifikante Zunahmen (>+15 %) finden sich aber auch im Süden von Baden-Württemberg bzw. Rheinland-Pfalz. Vergleichsweise geringe, nicht-signifikante Zunahmen von +5 bis +15% finden sich in weiten Teilen von Rheinland-Pfalz, im nördlichen Baden-Württemberg sowie dem westlichen Maingebiet in Bayern.

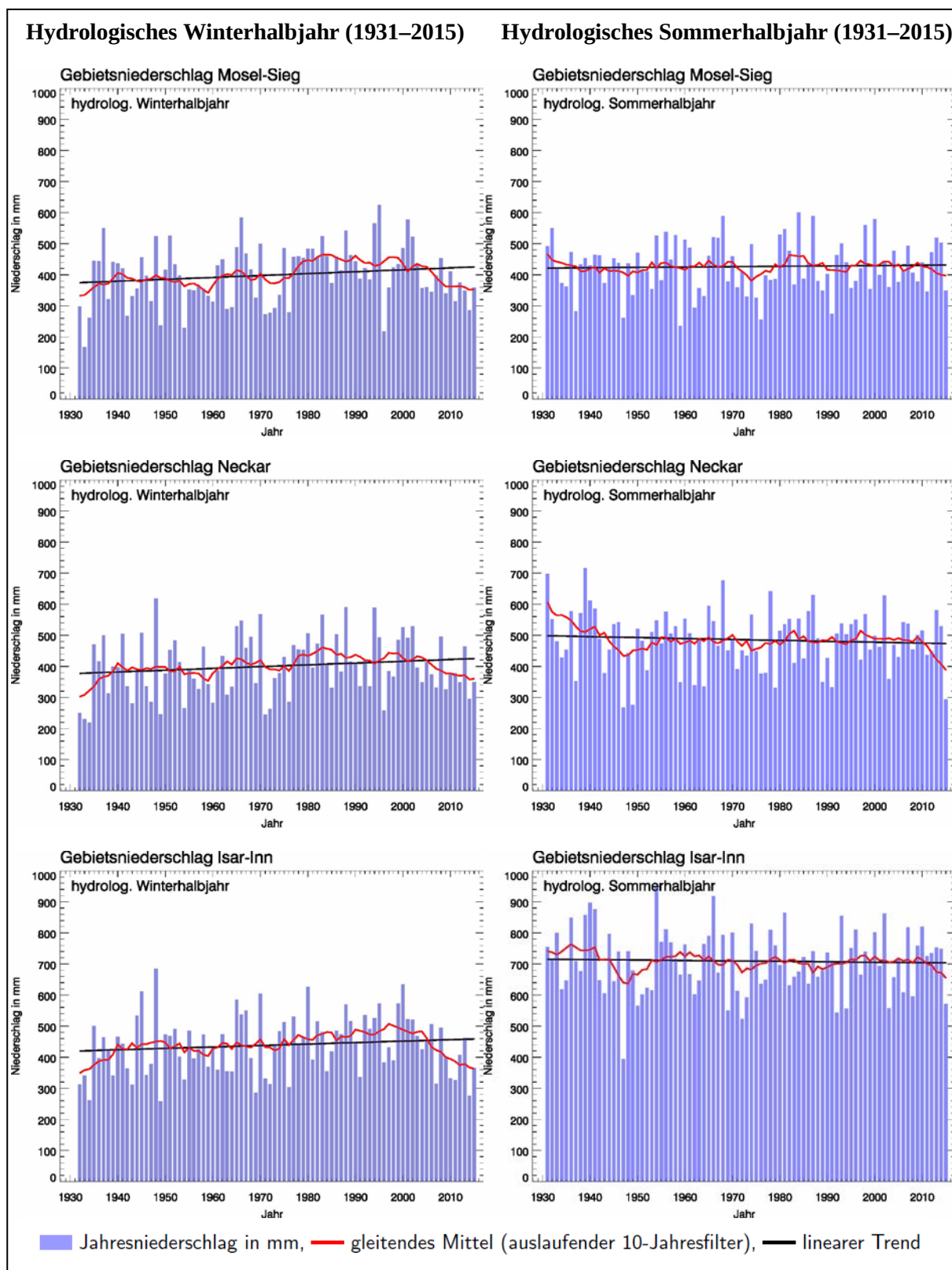


Abb. 8: Höhe und Trend der Gebietsniederschläge in den KLIWA-Regionen Mosel-Sieg, Neckar und Isar-Inn für die hydrologischen Halbjahre im Zeitraum 1931–2015.

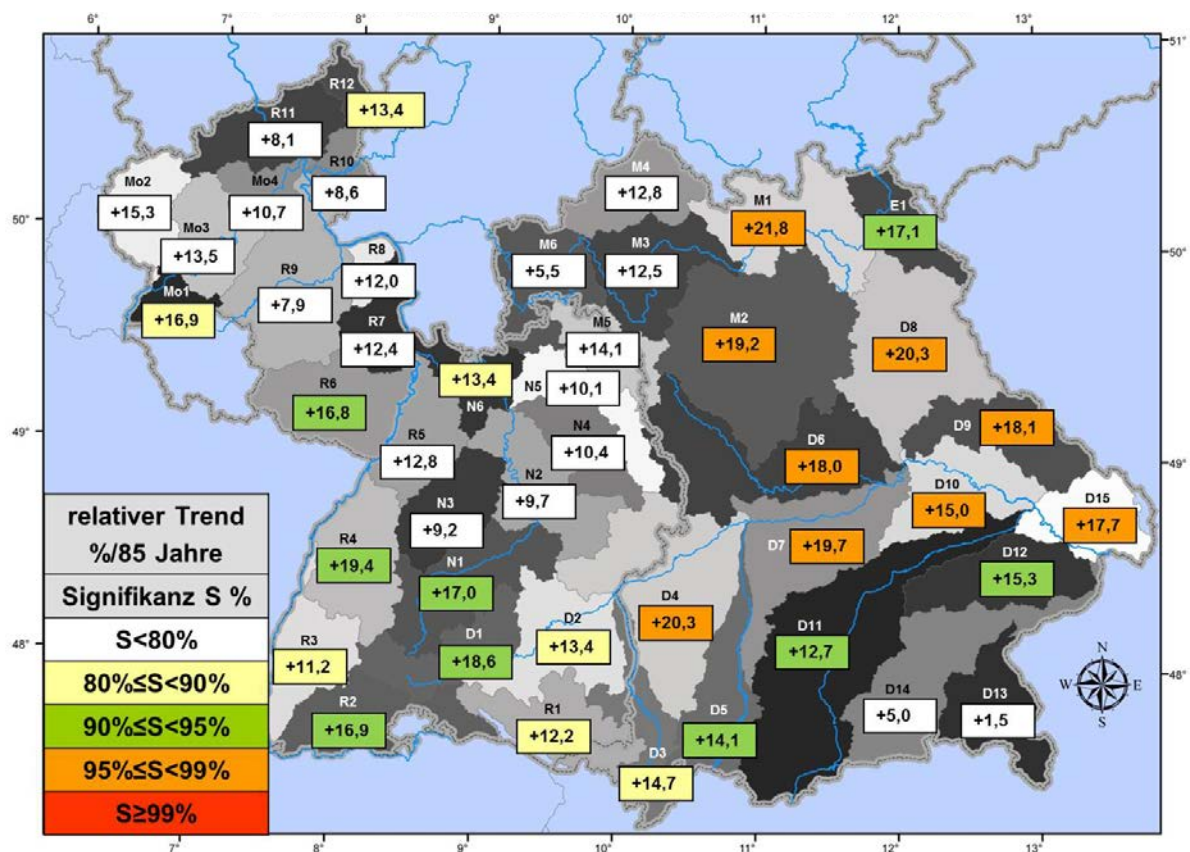


Abb. 9: Entwicklung des mittleren Gebietsniederschlags im hydrologischen Winterhalbjahr, relativer Trend (Änderung in Prozent vom Mittelwert 1931–2015).

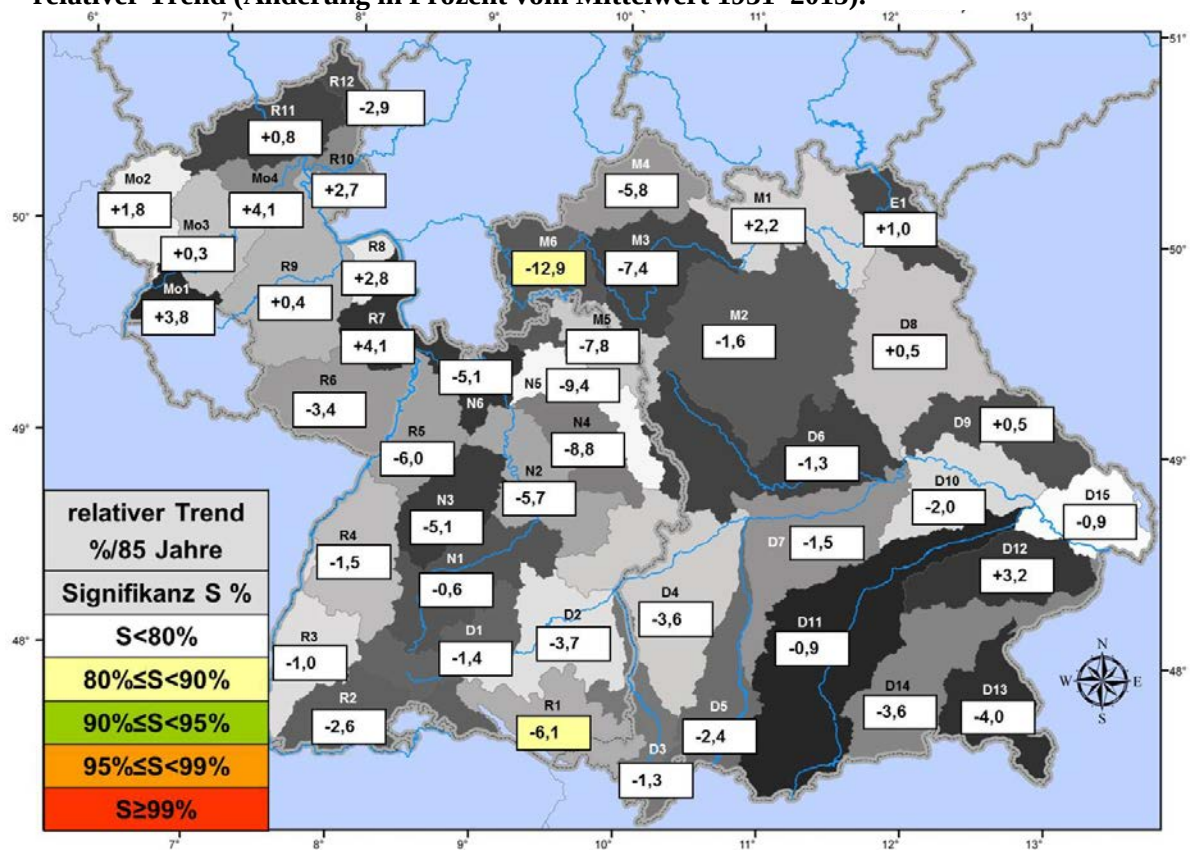


Abb. 10: Entwicklung des mittleren Gebietsniederschlags im hydrologischen Sommerhalbjahr, relativer Trend (Änderung in Prozent vom Mittelwert 1931–2015).



Die Abb. 10 zeigt das Trendverhalten der Gebietsniederschlagshöhen im hydrologischen **Sommerhalbjahr**. Für den Zeitraum 1931 bis 2015 sind nur schwache und vorwiegend nicht signifikante Änderungen (–13 % bis +4 %) zu finden. Bei der Mehrheit der Gebiete nimmt der mittlere Sommerniederschlag ab. Ausnahmen sind der Nordosten Bayerns sowie die Mehrheit der Untersuchungsgebiete in Rheinland-Pfalz mit leicht zunehmenden Trends. Alle im Sommerhalbjahr zu beobachtenden Trends sind als nicht signifikant zu betrachten (Signifikanz kleiner 80 %), allein in Gebiet R1 (Bodensee) und M6 (Main) ist ein schwach signifikanter Trend mit einer Abnahme von –6,1 % bzw. – 12,9 % nachzuweisen.

Die **Trendänderungen der Halbjahresniederschläge** werden in Tabelle 2 für die 70-jährigen Zeiträume 1931 bis 2000, 1941 bis 2010 und 1946 bis 2015 betrachtet. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten wurde auf eine einheitliche Länge der betrachteten Zeitreihe geachtet. Dabei stellt sich jedoch die Problematik der unterschiedlichen Startzeitpunkte 1931, 1941 bzw. 1946 für die Trendberechnung. Weitere Untersuchungen zeigen jedoch, dass die grundlegenden Aussagen (Veränderungen in Trendrichtung und Signifikanz) davon nicht betroffen sind. Im Gegensatz zur Temperatur treten beim Niederschlag größere Unterschiede in der Höhe der Trendänderungen auf.

Im Vergleich für das Winterhalbjahr zeigt sich in den meisten Gebieten weiterhin eine Abnahme der Trends, d.h. die vorwiegend positiven Trends haben sich in dem Zeitraum 1941 bis 2010 und auch im Zeitraum 1946 bis 2015 abgeschwächt. Sie bleiben zwar größtenteils in ihrer Tendenz erhalten (vgl. Tabelle 2), jedoch hat die Signifikanz der Trends in vielen Gebieten stark abgenommen. Im Zeitraum 1946 bis 2015 weisen nur noch 7 der 44 KLIWA-Untersuchungsgebiete signifikante Veränderungen auf. Dennoch zeigten sich für den Zeitraum 1941 bis 2010 noch einzelne Gebiete Trends mit einem hohen Signifikanzniveau. Diese Niveaus sind für den jüngsten Zeitraum 1946 bis 2015 nicht mehr zu finden, im Winterhalbjahr werden nur noch maximal Signifikanzniveaus von 80 % erreicht (nicht dargestellt).

Tab. 2: Überblick über die Veränderung des Trendverhaltens der mittleren Gebietsniederschläge der hydrologischen Halbjahre in den 44 KLIWA-Untersuchungsgebieten im Vergleich der Zeiträume 1931–2000, 1941–2010 und 1946–2015.

Tendenzen der mittleren Gebietsniederschläge	Untersuchungszeitraum von		
	1931–2000*	1941–2010*	1946–2015*
Hydrologisches Winterhalbjahr (Nov. – Apr.)			
↘ KLIWA-Untersuchungsgebiete mit abnehmendem Trend / signifikant	– / –	– / –	4 / –
↗ KLIWA-Untersuchungsgebiete mit zunehmendem Trend / signifikant	44 / 43	44 / 37	40 / 7
Hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai – Okt.)			
↘ KLIWA-Untersuchungsgebiete mit abnehmendem Trend / signifikant	31 / 3	1 / –	1 / –
↗ KLIWA-Untersuchungsgebiete mit zunehmendem Trend / signifikant	13 / –	43 / 4	43 / –

*Gesamtzahl KLIWA-Untersuchungsgebiete mit vorliegendem Trend / **Anzahl KLIWA-Untersuchungsgebiete mit signifikantem Trend $\alpha \geq 80$ %**

Für das Sommerhalbjahr zeigt der Vergleich der drei 70-jährigen Zeiträume in Tabelle 2 eine klare Veränderung zu positiven Trends gegenüber 1931 bis 2000. Nahezu alle Untersuchungsgebiete weisen für die Zeiträume 1941 bis 2010 sowie 1946 bis 2015 positive Trends auf, auch wenn diese teilweise sehr schwach sind. Bei der Interpretation der Ergebnisse für das Sommerhalbjahr ist jedoch Vorsicht geboten, da nahezu alle Trends weiterhin nicht signifikant sind, mit wenigen, schwach signifikanten Ausnahmen im Zeitraum 1941 bis 2010.

Starkniederschläge

Zusätzlich zur Betrachtung der mittleren Gebietsniederschläge wurden auch die Starkniederschläge (halbjährliche Maximalwerte der eintägigen Gebietsniederschlagshöhe) im Rahmen des Monitorings untersucht. Vergleichsauswertungen haben gezeigt, dass sich die gebietsbezogenen Betrachtungen gut mit stationsbezogenen Auswertungen decken. In den Abbildung 11 und Abbildung 12 sind die Trendauswertungen der maximalen eintägigen Gebietsniederschlagshöhe in der gleichen Weise wie für die Gebietsniederschlagshöhe dargestellt. Insgesamt sind die Trendverläufe von Gebiet zu Gebiet deutlich uneinheitlicher als beim mittleren Gebietsniederschlag. Dies hängt damit zusammen, dass Starkniederschläge seltene Ereignisse darstellen, die nur manchmal räumlich größere Gebiete umfassen; dies gilt vor allem für das Sommerhalbjahr.

Im hydrologischen **Winterhalbjahr** (Abb. 11) findet man im Zeitraum 1931 bis 2015 in fast ganz Süddeutschland zunehmende bis stark zunehmende maximale eintägige Gebietsniederschlagshöhen (bis +33 %). Sechs der 44 Untersuchungsgebiete zeigen allerdings auch nicht signifikante Abnahmen. Die höchsten Zunahmen (hoch signifikant) finden sich im nordöstlichen Bayern, dabei liegen im oberen Maingebiet und den östlich angrenzenden Saale- und Naabgebieten die Zunahmen zwischen 27 und 33 % und sind damit deutlich höher als die Zunahmen bei den mittleren Gebietsniederschlagshöhen. Weiter südlich lassen hingegen Trendstärke und Signifikanz nach. In Baden-Württemberg treten schwach bis stark signifikante Zunahmen zwischen 8 und 17 % vor allem im Süden auf (Oberlauf von Rhein, Neckar und Donau). Die Veränderungen in Rheinland-Pfalz sind mit Ausnahme der Sieg nicht signifikant. Im Gegensatz zu den mittleren Gebietsniederschlagshöhen gibt es vermehrt Gebiete, die keine signifikanten Zunahmen oder leichte Abnahmen aufweisen z. B. in der Rheinebene und am Neckar, aber auch in Südbayern.

Im **Sommerhalbjahr** (Abb. 12) zeigen die Trends der Zeitreihe 1931 bis 2015 bei den maximalen eintägigen Gebietsniederschlagshöhen ein deutlich anderes Bild, als beim mittleren Gebietsniederschlag. In der Mehrheit der Gebiete sind zunehmende Trends mit maximal +18 % zu finden, lediglich 17 der 44 Untersuchungsgebiete zeigen abnehmende Trends. Alle diese Trends sind aber, mit Ausnahme von wenigen Gebieten, nicht signifikant. Signifikante Zunahmen finden sich dabei am oberen Neckar und der oberen Donau sowie in der westlichen Rheinland-Pfalz. Stärkere Abnahmen (–19 bis –23 %) sind im Südosten von Bayern und im unteren Maingebiet zu beobachten; letztere sind auch signifikant.

Für die Erstellung des vorliegenden Berichts sind zunächst umfangreiche Auswertungen für den Niederschlag für die einzelnen KLIWA-Untersuchungsgebiete (vgl. Abb. 4) durch den KLIWA-Partner DWD durchgeführt worden, die hier selbst nicht oder nur in stark zusammengefasster Form dargestellt werden konnten. Diese sind in Form einer Ergänzung zum Klimamonitoringbericht 2016 auf der Internetseite von KLIWA [www.kliwa.de] als „Monitoringbericht 2016 - Niederschlag - Zusätzliche Auswertungen für die KLIWA-Untersuchungsgebiete“ zum Download verfügbar.

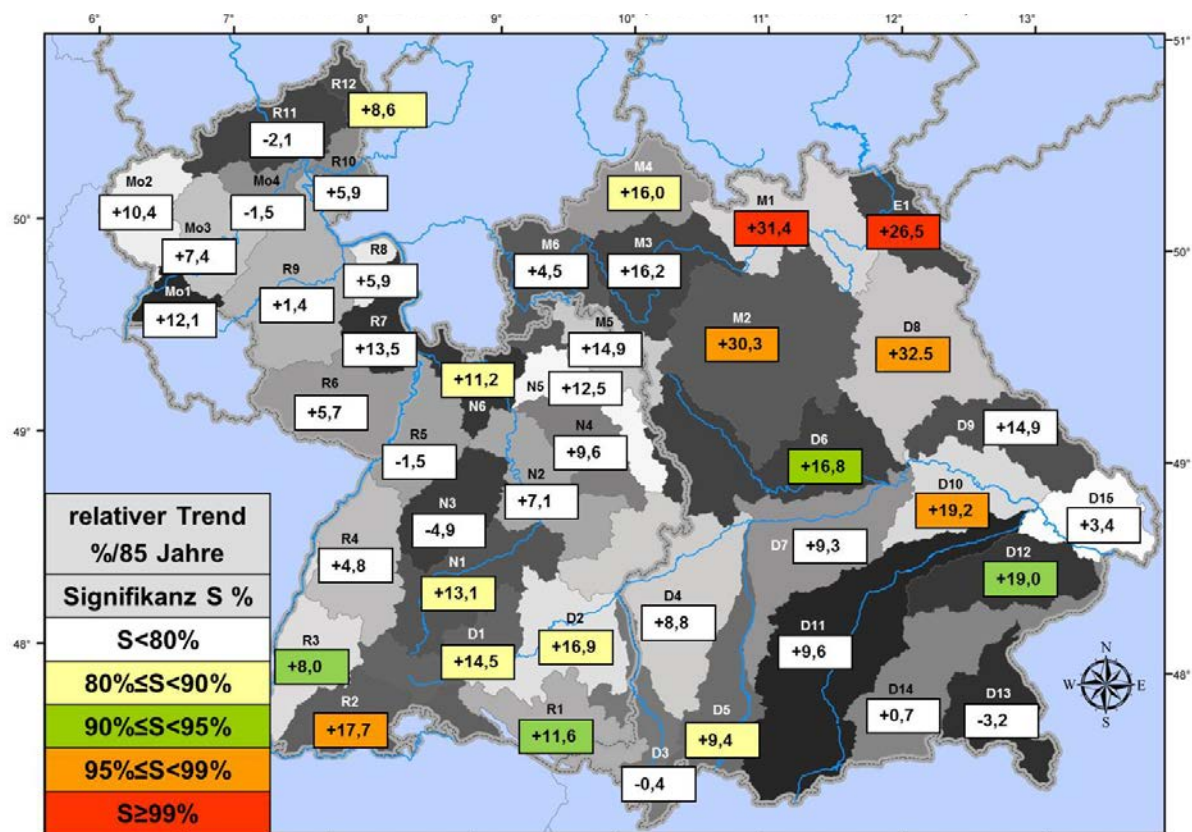


Abb. 11: Entwicklung der max. 1-tägigen Gebietsniederschlagshöhen im hydrologischen Winterhalbjahr, relativer Trend (Änderung in Prozent vom Mittelwert 1931–2015).

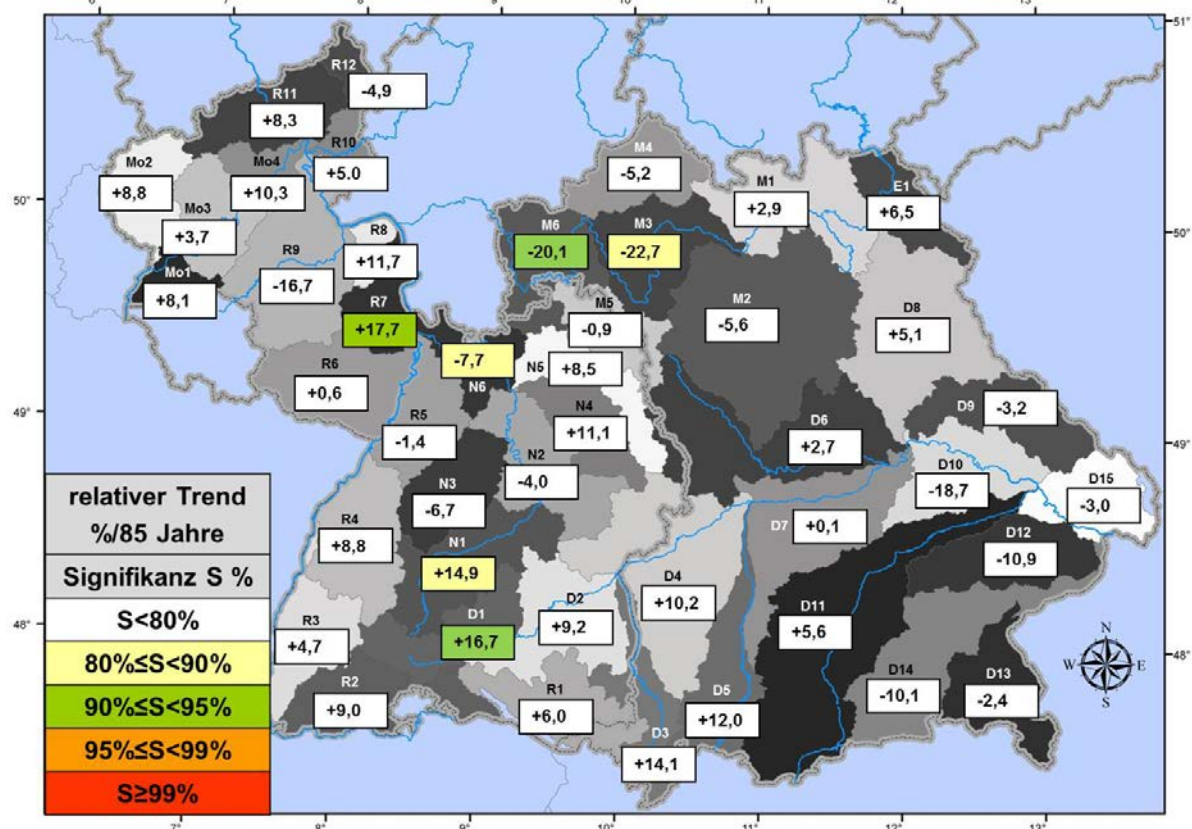


Abb. 12: Entwicklung der max. 1-tägigen Gebietsniederschlagshöhen im hydrologischen Sommerhalbjahr, relativer Trend (Änderung in Prozent vom Mittelwert 1931–2015).

6 Hochwasserabflüsse

6.1 Bisherige Auswertungen

Im Jahr 2000 wurde im Rahmen von KLIWA das Trendverhalten der beobachteten Hochwasserabflüsse an 90 repräsentativen Pegeln untersucht, um mögliche Hinweise auf Auswirkungen des beginnenden Klimawandels zu erhalten [KLIWA Heft 2]. Die Auswertung der Abflüsse von 1932 bis 1998 führte zu der Feststellung, dass eine signifikante flächendeckende Veränderung im Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Bayern und Baden-Württemberg bisher nicht eingetreten ist. Die Ergebnisse des ersten Monitoringberichtes 2008 [KLIWA 2008] zeigten vergleichbare Ergebnisse. Allerdings ergab sich vor allem für Bayern eine größere Anzahl von Pegeln mit steigendem Trend. Es ergaben sich demnach Hinweise auf Änderungen im Jahresgang der Hochwasserabflüsse und regional Hinweise auf eine Häufigkeitszunahme von Hochwasserabflüssen. Diese Aussagen wurden im letzten Monitoringbericht 2011 [KLIWA 2011] bestätigt. Auf Grund der Zeitreihenverlängerung bis 2010 schwächten sich jedoch die zunehmenden Trends und die Anzahl der Pegel mit signifikanten Änderungen ab. Dies deutet auf eine Veränderung des allgemeinen Hochwasserabflussverhaltens nach 2000 hin. Analog zum vorherigen Monitoringbericht zeigte der Jahresgang der monatlichen Abflusshöchstwerte weiterhin, dass die Erhöhung im hydrologischen Winterhalbjahr besonders ausgeprägt ist. Für die meisten Gebiete Süddeutschlands ist dies auch die Jahreszeit mit der größten Hochwassergefährdung.

6.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung

In diesem Kurzbericht werden die verlängerten Zeitreihen für 115 Pegel ab 1932 bzw. ab Beobachtungsbeginn bis 2015 betrachtet, ausgewertet und auch mit den Zeiträumen 1932 bis 2000 und 1932 bis 2010 verglichen. Als repräsentative Datengrundlage für das Trendverhalten dienen wie bei den bisherigen Auswertungen der Zeitreihen die ausgewählten 115 Pegel in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz (vgl. Abb. 13). Die 25 betrachteten Pegel aus Rheinland-Pfalz weisen mit einem späteren Datenbeginn teilweise verkürzte Zeitreihen auf. Gegenüber den vorherigen Monitoringberichten können Abweichungen in den Daten auftreten, da für die aktuellen Untersuchungen der Hochwasserabflüsse auf Grund der Auflösung von Pegeln zwei andere Pegel verwendet werden mussten und außerdem eine aktualisierte Datengrundlage der Landesämtern vorlag.

Für die statistische Betrachtung des Langzeitverhaltens der jährlichen und halbjährlichen Abflusshöchstwerte eines Pegels wurden die vorhandenen monatlichen Höchstwerte des Abflusses zu Jahresserien für das hydrologische Jahr, das Sommer- und das Winterhalbjahr zusammengefasst. Für diese Serien wurde anschließend jeweils die langjährige Veränderung in Form von linearen Trends und deren statistische Signifikanzen, also die Zuverlässigkeit der Trendaussagen, ermittelt.

Zusätzlich wurde der mittlere Jahresgang der Monatshöchstwerte der Abflüsse betrachtet. Um eventuelle Veränderungen in den Monatswerten zu erkennen, wurde die verfügbare Zeitreihe basierend auf vorherigen Auswertungen im Jahre 1974 geteilt und für das hydrologische Jahr und die Halbjahre getrennt ausgewertet.

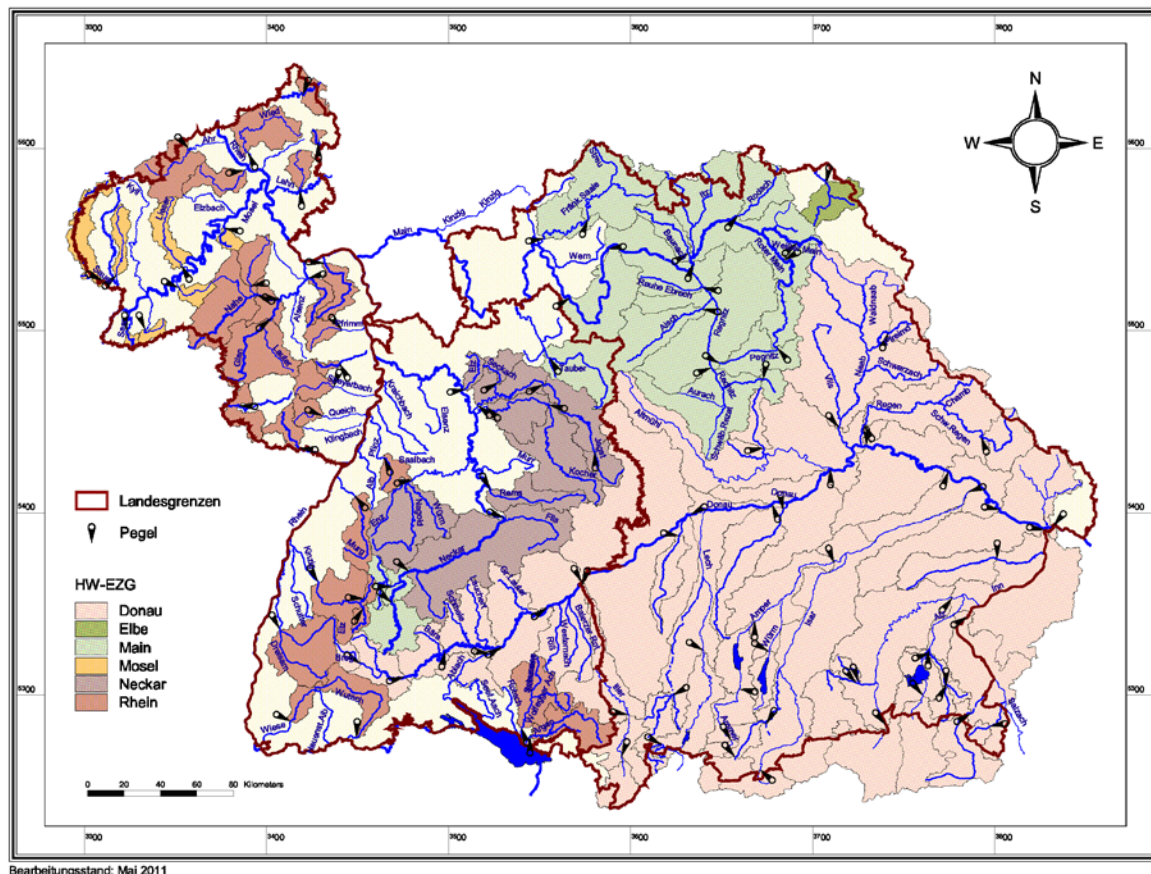


Abb. 13: Lage der betrachteten Abflussmessstellen (115 Pegel) für Untersuchungen zum Trendverhalten der Hochwasserabflüsse in Bayern (60), Baden-Württemberg (30) und Rheinland-Pfalz (25).

6.3 Neue Ergebnisse

Die Ergebnisse der Trenduntersuchungen sind für alle 115 Pegel in Tabelle 3 zusammengefasst aufgeführt. Die durchgeführte Trendanalyse der Hochwasserabflüsse 1932 bis 2015 zeigt für den überwiegenden Teil (79 Pegel) der 115 Pegel bezogen auf das **Gesamtjahr** einen ansteigenden Trend (ca. 69 %), 36 Pegel (ca. 31 %) weisen eine Abnahme auf. Bei der Bewertung der Ergebnisse muss jedoch berücksichtigt werden, dass die an den Pegeln ermittelten, zunehmenden Trends nur zu einem guten Drittel signifikant sind (Signifikanzniveau von $\alpha \geq 80\%$), an den Pegeln mit abnehmendem Trend sind lediglich 6 Pegel (17 %) signifikant. Da die Ergebnisse bisher eine starke räumliche Variabilität zeigten und deshalb belastbare regionale Muster des Trendverhaltens und der Trendstärke nicht erkennbar waren, wurde auf eine räumliche Auswertung verzichtet. Beispielfhaft ist in Abb. 14 das Ergebnis der Trenduntersuchung der Zeitreihe ab Beobachtungsbeginn bis 2015 für die Pegel Donauwörth an der Donau, Rotenfels an der Murg und Martinstein 2 an der Nahe mit einem ansteigenden Trend (rot) dargestellt.

Im hydrologischen **Winterhalbjahr** zeigen 71 % der Pegel steigende und 29 % fallende Trends an. Allerdings sind nur 39 % der steigenden und nur 15 % der fallenden Trends signifikant. Im hydrologischen **Sommerhalbjahr** zeigen 58 % steigende und 42 % fallende Trends bei den Hochwasserabflüssen an. Davon ist ungefähr die Hälfte der Zunahmen und ca. 13 % der Abnahmen signifikant.

Tab. 3: Überblick über das Trendverhalten der Hochwasserabflüsse an den 115 untersuchten Pegeln in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz im Vergleich der Zeiträume 1932–2000, 1932–2010 und 1932–2015.

Tendenzen	Untersuchungszeitraum von		
	1932–2000*	1932–2010*	1932–2015*
Hydrologisches Gesamtjahr (Nov. – Okt.)			
↘ Pegel mit abnehmendem Trend / signifikant	26 / 6	30 / 5	36 / 6
↗ Pegel mit zunehmendem Trend / signifikant	89 / 43	85 / 34	79 / 32
Hydrologisches Winterhalbjahr (Nov. – Apr.)			
↘ Pegel mit abnehmendem Trend / signifikant	23 / 4	28 / 5	33 / 5
↗ Pegel mit zunehmendem Trend / signifikant	92 / 42	87 / 34	82 / 32
Hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai – Okt.)			
↘ Pegel mit abnehmendem Trend / signifikant	43 / 9	46 / 7	48 / 6
↗ Pegel mit zunehmendem Trend / signifikant	72 / 30	69 / 32	67 / 34

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

Bei der Betrachtung der einzelnen Bundesländer treten nur geringfügige Unterschiede im Verhalten der Hochwasserabflüsse für den Zeitraum 1932 bis 2015 auf. In allen Bundesländern überwiegt deutlich der Anteil der Pegel mit steigenden Veränderungen. Lediglich in Rheinland-Pfalz ergibt sich für das Sommerhalbjahr ein höherer Anteil mit Abnahmen (ca. 70 %). Dies ist auch eine Folge davon, dass die Zeitreihen in Rheinland-Pfalz erst nach 1932 beginnen. Während in Baden-Württemberg bis zu 80 % der Pegel Zunahmen im Gesamtjahr und Winterhalbjahr zeigen, sind dies in Bayern ca. 70 bis 75 % und in Rheinland-Pfalz ca. 50 % der Pegel.

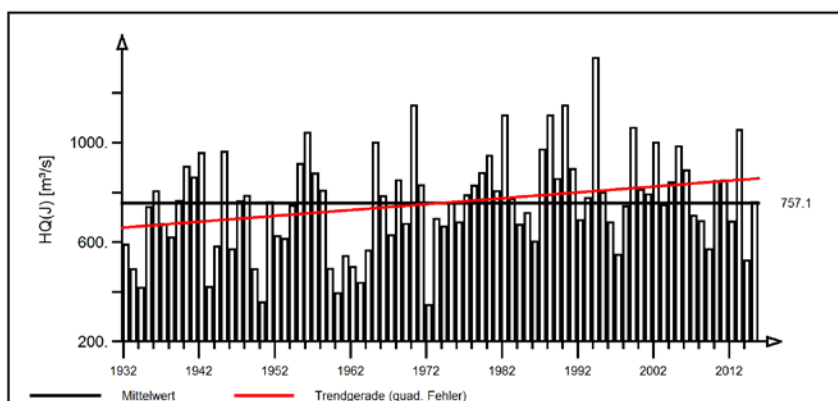
Der **Vergleich der Untersuchungsergebnisse** für die Zeiträume 1932 bis 2000, 1932 bis 2010 und 1932 bis 2015 in Tabelle 3 lässt relativ ähnliche Ergebnisse erkennen. Vorwiegend zeigt sich für die drei Zeiträume eine Tendenz zu steigenden Hochwasserabflüssen. Infolge der Datenverlängerung bis zum Jahr 2015 ist die zunehmende Tendenz in den Hochwasserabflüssen allerdings insbesondere bei den Pegeln aus Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz weiter abgemindert, analog sind geringfügig mehr fallende Trends zu beobachten. Dadurch resultiert insgesamt für das Sommerhalbjahr eine gleichmäßigere Verteilung auf abnehmende und zunehmende Veränderungen für den gesamten Zeitraum bis 2015. Die Auswertungen zeigen somit, dass sich nach 2000 das Hochwasserabflussverhalten verändert hat. Die zunächst bis zum Jahr 2000 große Anzahl von Pegeln mit stark steigenden Hochwassertrends ist bereits bei einer Datenverlängerung bis 2010 rückläufig und die Trends stellen sich deutlich abgemildert dar. Die weitere Datenverlängerung bis 2015 bestätigt diesen Rückgang und die Abschwächung der steigenden Trends.



Pegel Donauwörth/Donau

(Pegel-Nr. 1003980)

Jährliche Höchstabflüsse HQ(J) 1932-2015 (hydrologisches Jahr)

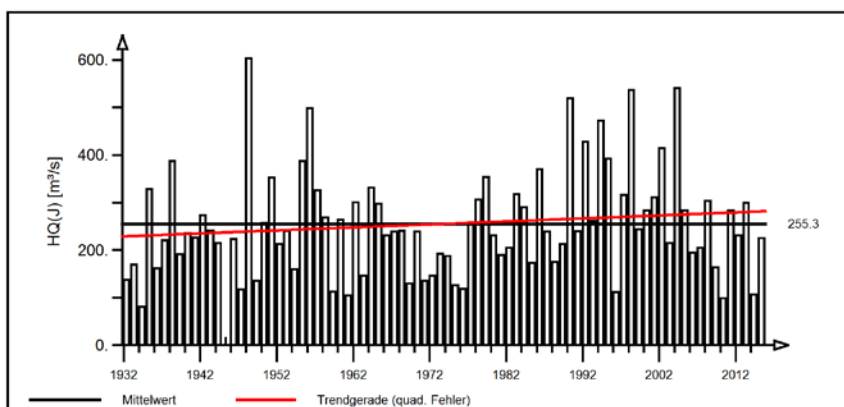


Mittelwert und linearer Trend: $2.369 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{a}$
(Trend-Signifikanz nach Mann-Kendall: 98%)

Pegel Rotenfels/Murg

(Pegel-Nr. 1301)

Jährliche Höchstabflüsse HQ(J) 1932-2015 (hydrologisches Jahr)

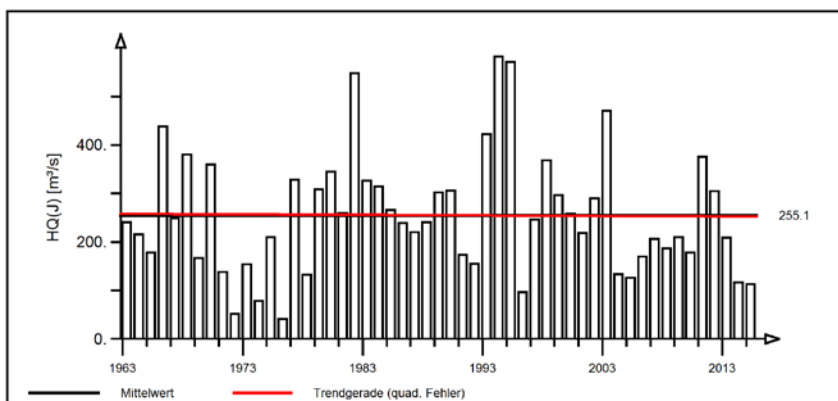


Mittelwert und linearer Trend: $0.629 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{a}$
(Trend-Signifikanz nach Mann-Kendall: 80%)

Pegel Martinstein 2/Nahe

(Pegel-Nr. 25400407)

Jährliche Höchstabflüsse HQ(J) 1963-2015 (hydrologisches Jahr)



Mittelwert und linearer Trend: $-0.118 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{a}$
(Trend nicht signifikant nach Mann-Kendall)

Abb. 14: Ergebnisse der Trenduntersuchung von jährlichen Höchstabflüssen am Beispiel dreier Pegel für den Zeitraum 1932–2015 (oben & Mitte) bzw. 1954–2015 (unten).

Die Trends werden demnach im Allgemeinen durch die Zeitreihenverlängerung schwächer, dies bestätigen auch die Berechnungen der Signifikanzniveaus, die ebenfalls abnehmen. Die drei Bundesländer zeigen bei den langen Zeitreihen ein sehr vergleichbares Verhalten. In Baden-Württemberg bleibt infolge der Datenverlängerung vom Jahr 2010 bis zum Jahr 2015 die Anzahl der Pegel mit Zunahmen nahezu gleich, die Steigungen gehen bei den Scheitelwerten des Winterhalbjahrs jedoch zurück. In Rheinland-Pfalz, geht auf Grund der Datenverlängerung vom Jahr 2010 bis zum Jahr 2015, der Anteil der Pegel mit Zunahmen zwischen 10 % und 20 % zurück, wobei die größte Reduktion bei den Scheitwerten des Winterhalbjahres vorhanden ist. Gleichzeitig gehen auch die Steigungen deutlich zurück. In Bayern treten aufgrund der Zeitreihenverlängerung bis 2015 keine wesentlichen Änderungen auf.

Das beobachtete Ergebnis der Entwicklung bei den Jahres- und Halbjahreswerten wird auch durch die Auswertung des **Jahresganges der monatlichen Abflusshöchstwerte** und der feststellbaren Veränderungen unterstützt. In Abbildung 15 sind exemplarisch für die Pegel Donauwörth, Rotenfels und Martinstein 2 der Jahresgang, bezogen auf die einzelnen Monate und die Mittelwerte für die beiden hydrologischen Halbjahre, dargestellt. Zusätzlich wurde die Zeitreihe im Jahr 1974 geteilt. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf mögliche Veränderungen der monatlichen Höchstwerte, insbesondere in den abflussstarken Zeiten. Die mittleren Hochwasserabflüsse (MHQ) der Zeitperiode von 1974 bis 2015 liegen mehrheitlich deutlich über dem Mittelwert der gesamten Zeitreihe und der früheren Periode bis 1973.

Diese Zunahme wird überwiegend durch eine Erhöhung der Hochwasser im hydrologischen Winterhalbjahr hervorgerufen (Donauwörth: +24 % / Rotenfels: +24 % / Martinstein 2: +8 % im Vergleich zu Periode bis 1973), während im Sommerhalbjahr geringere Veränderungen bzw. sogar leichte Abnahmen (Donauwörth: +19 % / Rotenfels: +3 % / Martinstein 2: –11 % im Vergleich zur Periode bis 1973) auftreten. Diese Entwicklung deckt sich mit der Auswertung des Trendverhaltens. Durch die Datenverlängerung bis 2015 ergeben sich gegenüber den bisherigen vorausgegangenen Auswertungen im ersten Monitoringbericht nur geringfügige prozentuale Änderungen. Diese drücken die vorher beschriebene Abminderung der Zunahmen aus, die generellen Tendenzen bleiben allerdings erhalten. Eine Ausnahme stellt der Pegel Martinstein 2 dar, an dem, auf Grund der Verlängerung bis 2015, abnehmende Tendenzen auftreten.

Insgesamt lässt sich aus den Untersuchungen schlussfolgern, dass für den gesamten betrachteten Zeitraum 1932 bis 2015 weiterhin überwiegend steigende Hochwasserabflüsse im Gesamtjahr, im Winterhalbjahr und in abgeschwächter Form auch im Sommerhalbjahr zu verzeichnen sind. Von den Zunahmen sind allerdings im Mittel nur 40 bis 50 % der Trends signifikant. Durch die Zeitreihenverlängerung bis 2015 schwächen sich zudem die Trends gegenüber den Betrachtungen bis 2010 weiterhin ab.

Für die Erstellung des vorliegenden Berichts sind im Auftrag von KLIWA zunächst umfangreiche Auswertungen für die Hochwasserabflüsse für die betrachteten Pegel (vgl. Abb. 13) durchgeführt worden, die hier selbst nicht oder nur in stark zusammengefasster Form dargestellt werden konnten. Diese sind in Form einer Ergänzung zum Klimamonitoringbericht 2016 auf der Internetseite von KLIWA [www.kliwa.de] als „Hochwasserabflüsse - Zusätzliche Auswertungen für das KLIWA-Untersuchungsgebiet“ zum Download verfügbar.

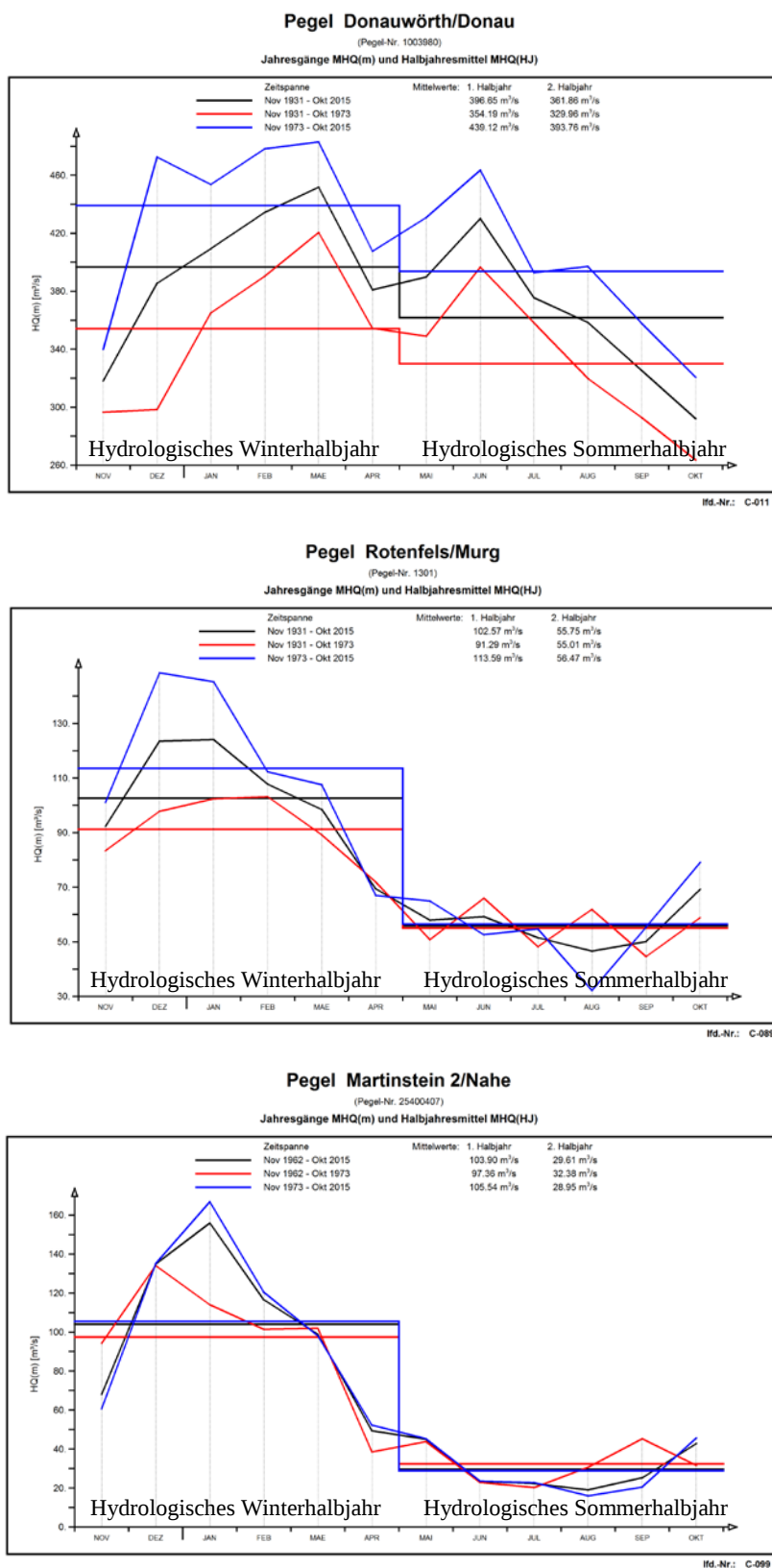


Abb. 15: Jahresgang des monatlichen mittleren Höchstabflusses und der Halbjahresmittel am Beispiel der Pegel Donauwörth, Rotenfels und Martinstein 2 für die gesamte Zeitreihe und die beiden Teilzeitreihen 1931 bzw. 1953–1974 und 1974–2015.

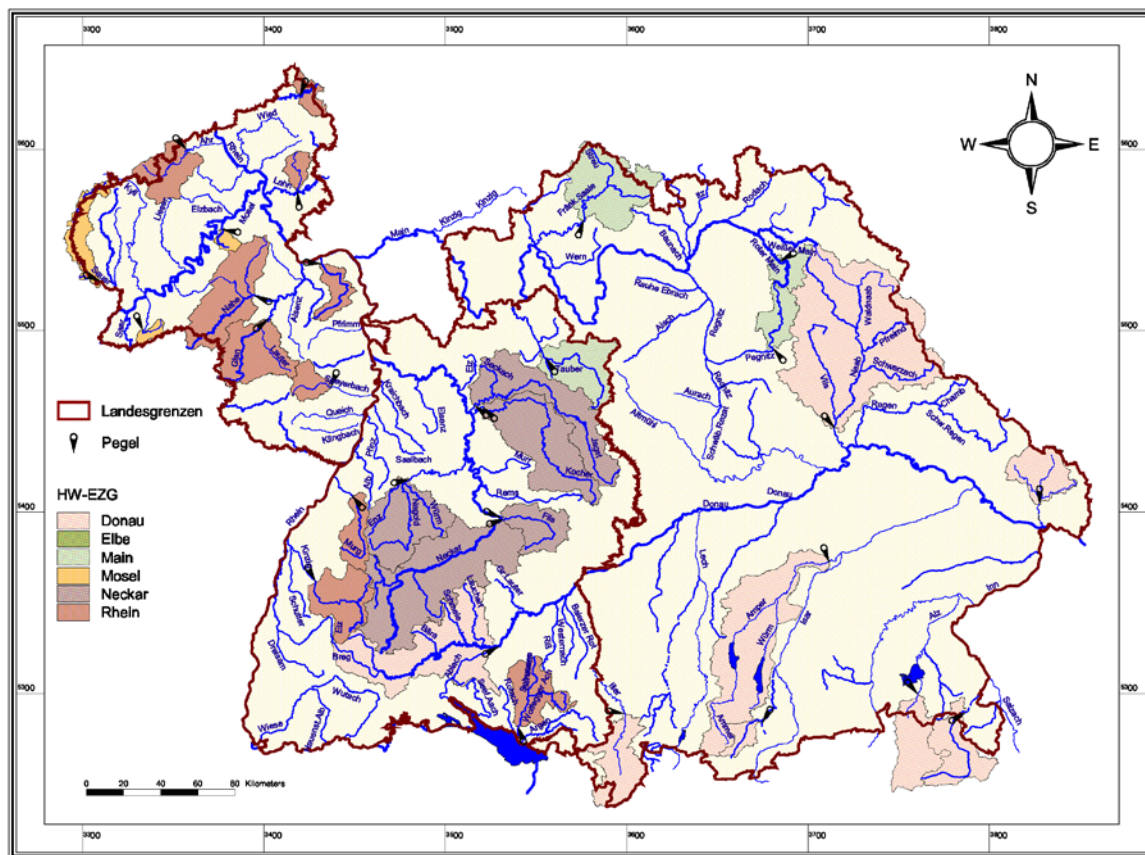
7 Niedrigwasserabflüsse

7.1 Bisherige Auswertungen

Das Langzeitverhalten der Niedrigwasserabflüsse wurde in KLIWA erstmals im Monitoringbericht 2011 betrachtet [KLIWA 2011]. Für das gesamte KLIWA-Gebiet konnten keine eindeutigen Rückschlüsse über das Langzeitverhalten der Niedrigwasserabflüsse gemacht werden. Die zunehmenden und abnehmenden Tendenzen sind im Zeitraum 1951 bis 2010 für die jährlichen Niedrigstwasserabflüsse relativ ausgeglichen. Zudem sind die ermittelten Veränderungen mehrheitlich nicht signifikant. Die maximale Dauer von Niedrigwasserperioden war überwiegend rückläufig; dies deutet auf eine Entspannung der Niedrigwassersituation in den letzten Jahren hin. Allerdings sind diese Tendenzen größtenteils nicht signifikant.

7.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung

Exemplarisch werden Niedrigwasserabflüsse an 30 Pegeln (10 je Bundesland) für die Zeiträume 1951 bis 2000, 1951 bis 2010 und 1951 bis 2015 untersucht (vgl. Abb. 16). Drei der betrachteten Pegel aus Rheinland-Pfalz weisen mit einem Datenbeginn in den 1970er Jahren verkürzte Zeitreihen auf. Gegenüber den vorherigen Monitoringberichten können Abweichungen in den Daten auftreten, weil eine aktualisierte Datengrundlage von den Landesämtern vorliegt. Betrachtet werden verschiedene Niedrigwasserkennwerte: Der jährliche Niedrigstwasserabfluss NQ(J), das jährlich niedrigste arithmetische Mittel des Abflusses an sieben aufeinanderfolgenden Tagen NM7Q(J) sowie die maximale Dauer von Niedrigwasserperioden.



Bearbeitungsstand: Mai 2011

Abb. 16: Lage der betrachteten Abflussmessstellen (30 Pegel) für Untersuchungen zum Trendverhalten der Niedrigwasserabflüsse.



Für die statistische Betrachtung des Langzeitverhaltens der jährlichen Niedrigstwerte $NQ(J)$ und $NM7Q(J)$ eines Pegels wurden, analog dem Vorgehen bei der Auswertung der Hochwasserabflüsse, die vorhandenen monatlichen Niedrigstwerte zu Jahresserien für das hydrologische Jahr zusammengefasst. Die maximale Dauer von Niedrigwasserperioden basiert auf Betrachtungen zur Unterschreitung eines vorgegebenen Schwellenwertes (hier: mittlere jährliche Niedrigwasserabfluss $MNQ(J)$), wobei einzelne Überschreitungen die Dauer nicht unterbrechen. Es wird jeweils nur die größte zusammenhängende Zeitspanne einer Niedrigwasserperiode betrachtet.

Für die Jahreseinteilung der Abflusszeitreihe wurde größtenteils der Zeitraum Juni bis Mai des Folgejahres bestimmt. Zusätzlich wurde der mittlere Jahresgang der monatlichen Niedrigstwerte der Abflüsse betrachtet. Um eventuelle Veränderungen in den Monatswerten zu erkennen, wurde die verfügbare Zeitreihe im Jahre 1974 geteilt und für das gewählte Abflussjahr und für die Halbjahre getrennt ausgewertet.

Hinweise zur Interpretation

Veränderungen von Niedrigwasserabflüssen und Niedrigwasserperioden haben wesentliche Auswirkungen auf die Energiewirtschaft, die Wasserversorgung, die Wassergüte und Wassermengenwirtschaft, die Binnenschifffahrt, die Gewässerökologie und die Fischerei. Das Langzeitverhalten der Niedrigwasserkenngrößen ist daher von großem Interesse. Bei der Interpretation der hier dargestellten Ergebnisse ist allerdings zu beachten, dass eine Beeinflussung der betrachteten Zeitreihen durch wasserwirtschaftliche Nutzung nicht auszuschließen ist. Diese Beeinflussung kann auf viele Arten erfolgen, zum Beispiel durch Entnahmen oder Ableitungen, durch Abflusserhöhung infolge von Speicherbewirtschaftung oder durch Einleitungen aus Kläranlagen. Teilweise erfolgt gezielt eine Niedrigwasseraufhöhung aus Talsperren oder Überleitungen, wie durch das Überleitungssystem Donau-Main in Bayern. So kann davon ausgegangen werden, dass die hier ermittelten Ergebnisse nicht nur den Einfluss eines anthropogenen Klimawandels auf die Niedrigwasserkennwerte widerspiegeln, sondern auch den anthropogenen wasserwirtschaftlichen Einfluss. Dies kann demnach zu einer Überlagerung und Maskierung der ursprünglichen Änderungen durch den Klimawandel führen.

Zudem kommt erschwerend hinzu, dass die Messungen an manchen Messstellen selbst Unsicherheiten aufweisen können, da viele nicht explizit für Niedrigwasser ausgelegt sind. Dies bedeutet, dass die Messunsicherheit bei niedrigen Abflüssen zum Beispiel durch Verkrautung hoch sein kann. Dennoch können die durchgeführten Untersuchungen beispielhaft zeigen, wie sich die Niedrigwasserabflüsse in den drei Bundesländern in der Vergangenheit entwickelt haben.

7.3 Neue Ergebnisse

Die Ergebnisse der Trenduntersuchungen wurden in Tabelle 4 für alle 30 Pegel mit verschiedenen Niedrigwasserkennwerten 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, auch auf Grund des beschränkten Auswertumfangs von 30 Pegeln. Von den ermittelten Veränderungen sind insgesamt nur ca. ein Drittel signifikant, Pegel mit zunehmenden Trends sind dabei deutlich häufiger vertreten. Die Datenverlängerung bis 2015 hatte auf diesen Anteil keine Auswirkung.

Tab. 4: Überblick über das Trendverhalten der Niedrigwasserabflüsse 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 $\alpha \geq 80 \%$

Beispielhaft sind in Abb. 17 die Ergebnisse ab 1951 bis 2015 für NQ(J) für die drei Pegel Kalleneck, Stein und Odenbach dargestellt. Die Zeitreihen in Abb. 17 zeigen deutlich, dass über den gesamten Zeitraum der Zeitreihe vergleichbare Niedrigwasserereignisse aufgetreten sind. Klar zu erkennen sind zum Beispiel die Trockenperioden Anfang der 70er und 90er Jahre sowie 2003 – auf Grund der Wahl des Zeitraums Juni bis Mai auf der Zeitachse um ein Jahr verschoben.

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.

Die **maximale Dauer der Niedrigwasserperioden** zeigt an den betrachteten Pegeln überwiegend einen abnehmenden Trend für den Zeitraum 1951 bis 2015 (ca. 83 %). Dies entspricht einer Entspannung der Niedrigwassersituation. Jedoch ist nur ungefähr die Hälfte der ermittelten Trends signifikant.

Die Betrachtung der **Trendänderungen** von NQ(J) und NM7Q(J) für die dargestellten Zeiträume 1951 bis 2000, 1951 bis 2010 und 1951 bis 2015 (Tabelle 4) lässt relativ ähnliche Ergebnisse erkennen. Die geringe Mehrheit von zunehmenden Trends bleibt demzufolge erhalten, deutliche Tendenzen sind jedoch auf Grund des Auswertumfangs nicht feststellbar. Auf die Anzahl an signifikanten Trends haben die Zeitreihenverlängerungen keinen Einfluss.

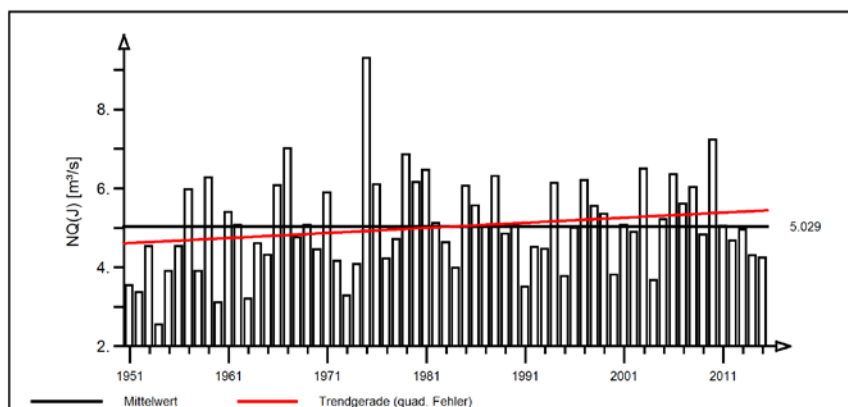
Das beobachtete Ergebnis der Entwicklung bei den Jahreswerten wird auch durch die Auswertung des Jahresganges der monatlichen Abflusshöchstwerte und der feststellbaren Veränderungen unterstützt. Analog dem Vorgehen bei den Hochwasserabflüssen wurde der Jahresgang bezogen auf die einzelnen Monate betrachtet und die Zeitreihe im Jahre 1974 geteilt, wie auch beispielhaft in Abb. 18 dargestellt. Demnach sind die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse nach 1974 mehrheitlich größer als vor 1974. Allerdings ist diese Entwicklung in dem Halbjahr mit der eigentlichen Niedrigwasserperiode, welche folglich auch die Kennwerte NQ(J) und NM7Q(J) größtenteils bestimmt, nicht so deutlich ausgeprägt. In Folge der Datenverlängerung bis 2015 ergeben sich kaum Veränderungen.



Pegel Kalteneck/Ilz

(Pegel-Nr. 1740600)

Jährliche Niedrigstabflüsse NQ(J) 1951-2015 (Jun-Mai)

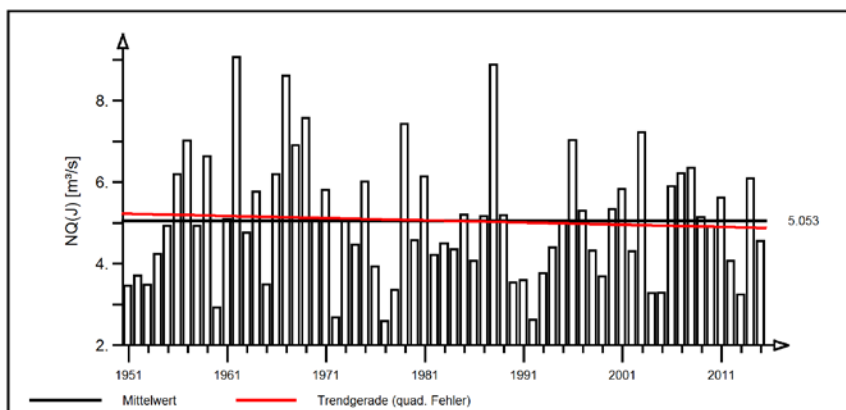


Mittelwert und linearer Trend: $0.013 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{a}$
(Trend-Signifikanz nach Mann-Kendall: 90%)

Pegel Stein/Kocher

(Pegel-Nr. 3465)

Jährliche Niedrigstabflüsse NQ(J) 1951-2015 (Jun-Mai)

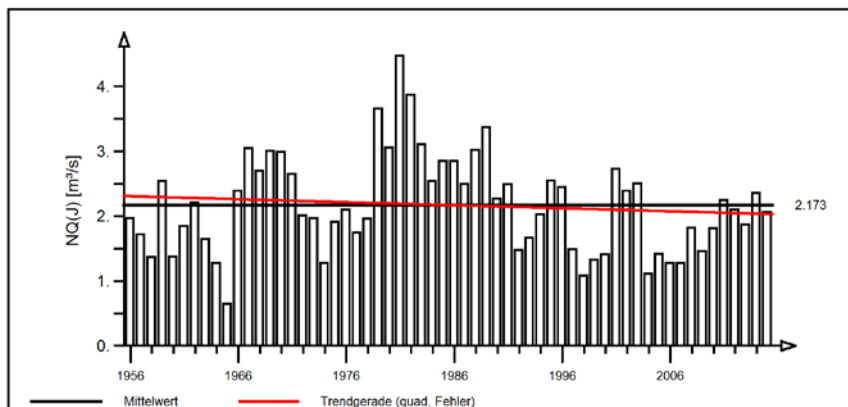


Mittelwert und linearer Trend: $-0.005 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{a}$
(Trend nicht signifikant nach Mann-Kendall)

Pegel Odenbach/Glan

(Pegel-Nr. 25460409)

Jährliche Niedrigstabflüsse NQ(J) 1956-2015 (Jun-Mai)



Mittelwert und linearer Trend: $-0.005 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{a}$
(Trend-Signifikanz nach Mann-Kendall: 60%)

Abb. 17: Ergebnisse der Trenduntersuchung von jährlichen Niedrigwasserabflüssen am Beispiel dreier Pegel für den Zeitraum 1951–2015 (oben & Mitte) bzw. 1956–2015 (unten).

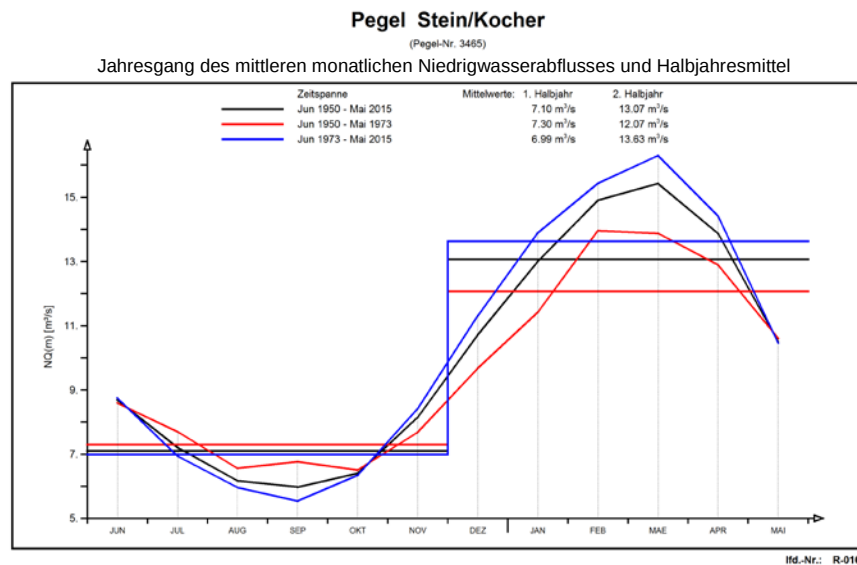


Abb. 18: Jahresgang des mittleren monatlichen Niedrigwasserabflusses und Halbjahresmittel am Beispiel des Pegels Stein/Kocher.

Auswertungen verkürzter Zeitreihen für den Zeitraum 1974 bis 2000 in vorhergehenden Untersuchungen ergaben, dass die für die langen Zeiträume ermittelte, steigende Tendenz in den Niedrigwasserkennwerten $NQ(J)$ und $NM7Q(J)$ in diesen Jahren unterbrochen scheint. Es zeigten sich für den verkürzten Zeitraum vermehrt abnehmende Niedrigwasserabflüsse. Infolge der Datenverlängerung bis zum Jahr 2015 ist diese abnehmende Tendenz für die Zeitreihen ab 1974 abgemindert und die Veränderungen tendieren zu einem Rückgang der fallenden Trends. Dies bedeutet, dass sich die zunehmende Tendenz der Niedrigwasserabflüsse auch in der jüngeren Vergangenheit fortgesetzt hat. Wie in Abbildung 17 zu erkennen ist, sticht das Niedrigwasserjahr 2011 in den Jahren 2011 bis 2015 nicht besonders markant hervor, da in diesem Jahr nur der Herbst, vor allem der November, extrem trocken waren. Auch 2015 ist vermutlich auf Grund der Verschiebung der Zeitachse durch die Wahl des Zeitraums noch nicht deutlich zu erkennen.

Insgesamt lässt sich daraus schlussfolgern, dass die durchgeführten Auswertungen für das gesamte KLIWA-Gebiet keine eindeutigen Rückschlüsse für das Langzeitverhalten der Niedrigwasserabflüsse erlauben. 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. Für die maximale Dauer von Niedrigwasserperioden sind Abnahmen zu beobachten, die auf eine Entspannung der Niedrigwassersituation hindeuten könnten. Allerdings sind die ermittelten Veränderungen größtenteils nicht signifikant. Die Zeitreihenverlängerung der letzten 15 Jahre erbrachte kaum Veränderungen im Trendverhalten. Zudem muss bei der Interpretation beachtet werden, dass gerade für die untersuchten Niedrigwasserabflüsse eine Beeinflussung durch wasserwirtschaftliche Nutzungen nicht auszuschließen ist. Diese kann klimatisch bedingte Veränderungen überlagern.

Für die Erstellung des vorliegenden Berichts sind im Auftrag von KLIWA zunächst umfangreiche Auswertungen für die Niedrigwasserabflüsse für die betrachteten Pegel (vgl. Abb. 16) durchgeführt worden, die hier selbst nicht oder nur in stark zusammengefasster Form dargestellt werden konnten. Diese sind in Form einer Ergänzung zum Klimamonitoringbericht 2016 auf der Internetseite von KLIWA [www.kliwa.de] als „Niedrigwasserabflüsse - Zusätzliche Auswertungen für das KLIWA-Untersuchungsgebiet“ zum Download verfügbar.



8 Mittlere Abflüsse

8.1 Bisherige Auswertungen

Im Jahr 2003 wurde im Rahmen von KLIWA das Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse in Baden-Württemberg und Bayern an 160 Pegeln (41 Baden-Württemberg, 119 Bayern) untersucht, um mögliche Auswirkungen des Klimawandels zu erhalten [KLIWA Heft 3]. Eine flächendeckende, signifikante Veränderung der mittleren jährlichen Abflüsse (MQ(J)) war dabei nicht nachweisbar. Bei einer zeitlich eingegengten Betrachtung auf die letzten 30 bis 40 Jahre, also die Zeitspanne, in der eine gewisse Veränderung der klimatischen Verhältnisse feststellbar ist, wurde jedoch eine Tendenz zu einer Zunahme der mittleren jährlichen und monatlichen Abflüsse in verschiedenen Gebieten festgestellt. In vorherigen Klimamonitoringberichten wurden die Untersuchungen zum Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse nicht aufgeführt, sie wurden jedoch aktuell eingefügt.

8.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung

Im vorliegenden Bericht werden die Zeitreihen für 114 Pegel ab 1932 bzw. Beobachtungsbeginn bis 2015 betrachtet, ausgewertet und auch mit den Zeiträumen 1932 bis 2000 und 1932 bis 2010 verglichen. Als repräsentative Datengrundlage dienen die bei der Untersuchung der Hochwasserabflüsse betrachteten Pegel, mit Ausnahme des Pegels Würzburg/Main. Somit bilden 114 Pegel die Untersuchungsgrundlage (vgl. Abb. 13). Die betrachteten Pegel aus Rheinland-Pfalz weisen mit einem späteren Datenbeginn teilweise verkürzte Zeitreihen auf.

Für die statistische Betrachtung des Langzeitverhaltens der jährlichen und halbjährlichen Abflusswerte (MQ(J) bzw. MQ(Wi)/MQ(So)) eines Pegels wurden die vorhandenen monatlichen Abflüsse zu Jahresserien für das hydrologische Jahr (November bis Oktober), sowie das Sommer- und Winterhalbjahr zusammengefasst. Die mittleren Abflüsse des Winterhalbjahres beziehen sich somit auf die Monate November bis April und die mittleren Abflüsse des Sommerhalbjahres auf die Monate Mai bis Oktober. Für diese Serien wurden anschließend jeweils die langjährige Veränderung in Form von linearen Trends und deren statistische Signifikanzen ermittelt.

Zusätzlich wurde der mittlere Jahresgang der mittleren Monatswerte MQ(m) der Abflüsse betrachtet. Um eventuelle Veränderungen in den Monatswerten zu erkennen, wurde die verfügbare Zeitreihe im Jahre 1974 geteilt und sowohl für das hydrologische Jahr als auch für die Halbjahre getrennt ausgewertet.

8.3 Neue Ergebnisse

Die Ergebnisse der Trenduntersuchungen sind für alle 114 Pegel in Tabelle 5 zusammengefasst. Die Trendanalyse der mittleren Abflüsse 1932 bis 2015 zeigt für die 114 Pegel im **Gesamtjahr** einen nahezu ausgeglichenen Trend, etwa 52 % der Pegel zeigen einen zunehmenden und ca. 48 % einen abnehmenden Trend. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Mehrzahl der Pegel (etwa 65 %) keinen signifikanten Trend aufweisen (Signifikanzniveau von $\alpha < 80\%$). Bezogen auf die 114 betrachteten Pegel ist insgesamt der Anteil von Pegeln mit signifikant zunehmenden Trends (20 %) leicht höher als von Pegeln mit abnehmendem Trend (14 %). Beispielhaft ist in Abbildung 19 das Ergebnis der Trenduntersuchung der Zeitreihe ab Beobachtungsbeginn bis 2015 für die Pegel Donauwörth an der Donau, Rotenfels an der Murg und Martinstein 2 an der Nahe mit einem ansteigenden Trend (rot) dargestellt.

Das hydrologische **Winterhalbjahr** zeigt mit zunehmenden Trends an 75 % der Pegel eine deutliche Tendenz zu steigenden mittleren Abflüssen, mit signifikant zunehmenden Trends an etwa der Hälfte der Pegel. Das hydrologische **Sommerhalbjahr** hingegen weist ein gegenteiliges Trendverhalten auf, hier sind ca. 71 % der Pegel abnehmend, von diesen weisen ungefähr 38 % eine signifikante Abnahme auf.

Für die beiden Bundesländer Bayern und Baden-Württemberg ergeben sich bei den Kennwerten des mittleren Abflusses insgesamt sehr vergleichbare Tendenzen. Der größte Anteil der Pegel (60 % Bayern, 80 % in Baden-Württemberg) zeigen im Gesamtjahr steigende Tendenzen. Im Winterhalbjahr verstärkt sich die Tendenz noch weiter, mit bis zu 95 % der Pegel in Baden-Württemberg mit steigenden Abflüssen. Im Sommerhalbjahr dagegen überwiegt der Anteil der Pegel mit Abnahmen. Im Gegensatz hierzu zeigen die mittleren Abflüsse des Jahres und des Winterhalbjahres in Rheinland-Pfalz einen deutlichen Anstieg des Anteils der Pegel mit fallenden Tendenzen. Für den Zeitraum bis 2015 ergeben sich hierfür Abnahmen bei 70 bis 90 % der Pegel, im Sommerhalbjahr liegt dieser Anteil ebenfalls bei ca. 70 %. Dieses gegensätzliche Verhalten ist möglicherweise auf unterschiedliche verfügbare Datengrundlage der verschiedenen Bundesländer zurück zu führen.

Tab. 5: Überblick über das Trendverhalten der mittleren Abflüsse an den 114 untersuchten Pegeln in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz im Vergleich der Zeiträume 1932–2000, 1932–2010 und 1932–2015.

Tendenzen	Untersuchungszeitraum von		
	1932–2000*	1932–2010*	1932–2015*
Hydrologisches Gesamtjahr (Nov. – Okt.)			
↘ Pegel mit abnehmendem Trend / signifikant	32 / 4	44 / 9	55 / 16
↗ Pegel mit zunehmendem Trend / signifikant	82 / 22	70 / 31	59 / 23
Hydrologisches Winterhalbjahr (Nov. – Apr.)			
↘ Pegel mit abnehmendem Trend / signifikant	17 / 1	23 / 1	29 / 3
↗ Pegel mit zunehmendem Trend / signifikant	97 / 43	91 / 50	85 / 45
Hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai – Okt.)			
↘ Pegel mit abnehmendem Trend / signifikant	69 / 16	75 / 23	81 / 31
↗ Pegel mit zunehmendem Trend / signifikant	45 / 15	39 / 13	33 / 10

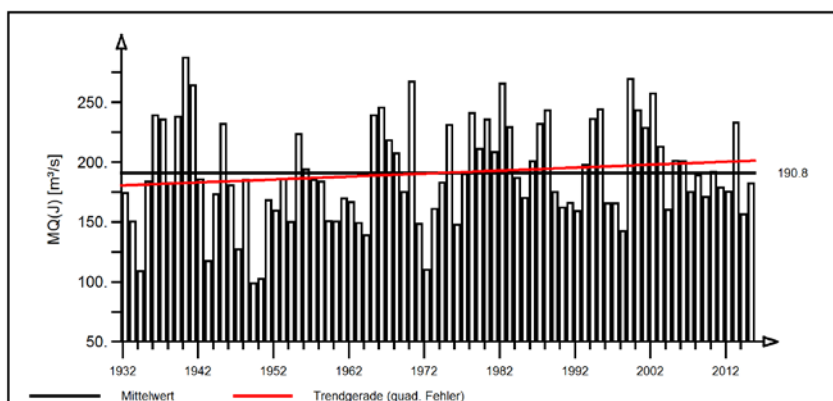
* Gesamtzahl Pegel mit vorliegendem Trend / **Anzahl Pegel mit signifikanten Trend $\alpha \geq 80$ %**



Pegel Donauwörth/Donau

(Pegel-Nr. 1003980)

Jährliche mittlere Abflüsse MQ(J) 1932-2015 (hydrologisches Jahr)

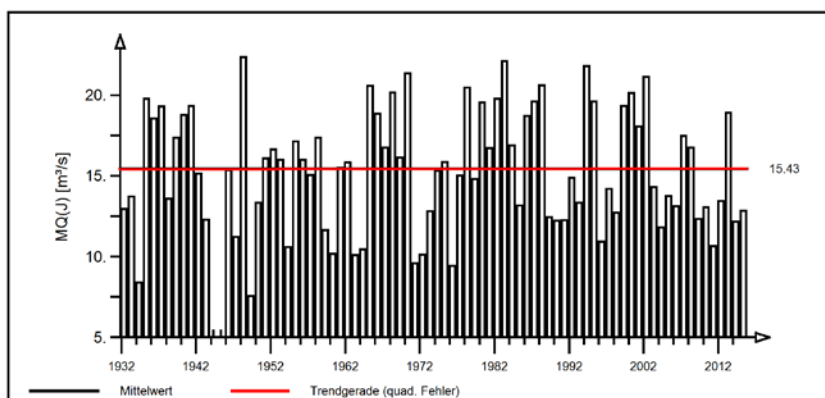


Mittelwert und linearer Trend: $0.247 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{a}$
(Trend-Signifikanz nach Mann-Kendall: 70%)

Pegel Rotenfels/Murg

(Pegel-Nr. 1301)

Jährliche mittlere Abflüsse MQ(J) 1932-2015 (hydrologisches Jahr)

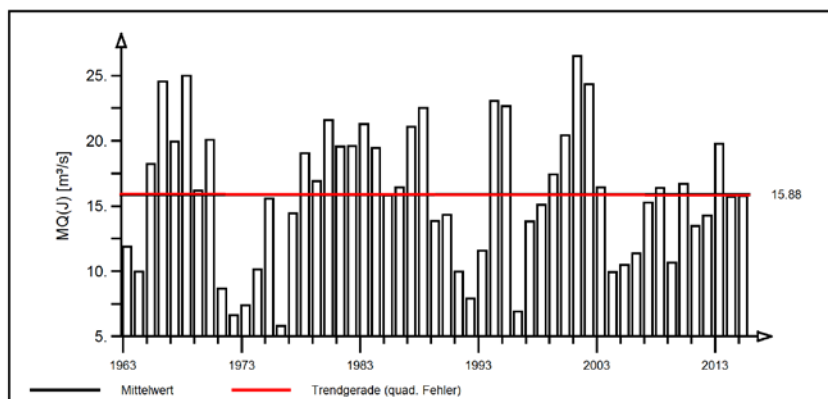


Mittelwert und linearer Trend: $0.001 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{a}$
(Trend nicht signifikant nach Mann-Kendall)

Pegel Martinstein 2/Nahe

(Pegel-Nr. 25400407)

Jährliche mittlere Abflüsse MQ(J) 1963-2015 (hydrologisches Jahr)



Mittelwert und linearer Trend: $-0.002 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{a}$
(Trend nicht signifikant nach Mann-Kendall)

Abb. 19: Ergebnisse der Trenduntersuchung von jährlichen mittleren Abflüssen am Beispiel dreier Pegel für den Zeitraum 1932–2015 (oben & Mitte) bzw. 1963–2015 (unten).

Bei einem Vergleich der Untersuchungsergebnisse für die Zeiträume 1932 bis 2000, 1932 bis 2010 und 1932 bis 2015 in Tabelle 5 zeigt sich für das Gesamtjahr bei einer Zeitreihenlänge bis 2000 mehrheitlich ein zunehmender Trend. Bei der Zeitreihenverlängerung bis 2015 geht der Anteil der Pegel mit Zunahmen jedoch deutlich zurück. Im hydrologischen Winterhalbjahr zeigen sich analoge Veränderungen aufgrund der Zeitreihenverlängerung, allerdings in einem sehr geringeren Umfang. Eine deutliche Zunahme der Pegel mit fallenden Trends ist hingegen für das hydrologische Sommerhalbjahr zu beobachten, einhergehend mit einer Verdopplung der Pegel mit signifikanten Abnahmen. Generell lassen sich demzufolge durch die Verlängerung bis 2015 Zunahmen der fallenden Trends beobachten. Jedoch dominieren insgesamt betrachtet im Winterhalbjahr weiterhin die zunehmenden Trends und im Sommerhalbjahr die abnehmenden Trends in allen drei Untersuchungszeiträumen. Auf Grund der unterschiedlichen Signifikanzniveaus sind diese Aussagen allerdings mit Ausnahme des Winterhalbjahres mit großen Unsicherheiten behaftet.

Das beobachtete Ergebnis der Entwicklung bei den Jahres- und Halbjahreswerten wird auch durch die Auswertung des **Jahresganges der monatlichen Abflusswerte** und der feststellbaren Veränderungen unterstützt. In Abbildung 20 sind exemplarisch für die Pegel Donauwörth, Rotenfels und Martinstein 2 der Jahresgang bezogen auf die einzelnen Monate und die Mittelwerte für die beiden hydrologischen Halbjahre aufgetragen. Zusätzlich wurde die Zeitreihe im Jahr 1974 geteilt. Dies ermöglichte Rückschlüsse auf mögliche Veränderungen der monatlichen mittleren Abflüsse. Die mittleren Abflüsse (MQ) der Zeitperiode von 1974 bis 2015 liegen deutlich über dem Mittelwert der gesamten Zeitreihe und der früheren Periode bis 1973.

Diese Zunahme wird überwiegend durch eine Erhöhung des mittleren Abflusses im hydrologischen Winterhalbjahr hervorgerufen (Donauwörth: +16 % / Rotenfels: +4 % / Martinstein 2: +13 % im Vergleich zu Periode bis 1973), während im Sommerhalbjahr eher Abnahmen (Donauwörth: -10 % / Rotenfels: +7 % / Martinstein 2: -4 % im Vergleich zur Periode bis 1973) auftreten bzw. ausgeglichene Verhältnisse vorliegen. Diese Entwicklung deckt sich mit der Auswertung des Trendverhaltens.

Insgesamt lässt sich aus den Untersuchungen schlussfolgern, dass für den gesamten betrachteten Zeitraum 1932 bis 2015 im Gesamtjahr die Trends relativ ausgeglichen sind. Im Winterhalbjahr hingegen überwiegen die steigenden mittleren Abflüsse, im Sommerhalbjahr die abnehmenden mittleren Abflüsse. Im Mittel sind jedoch nur ca. 38 % der Trends signifikant. Durch die Zeitreihenverlängerung bis 2015 geht die Anzahl der Pegel mit vormaligen zunehmenden Trends vor allem im Gesamtjahr sowie leicht im Winterhalbjahr zurück. Im Sommerhalbjahr erhöht sich die Anzahl der Pegel mit abnehmenden Trends mit der Zeitreihenverlängerung bis 2015.

Für die Erstellung des vorliegenden Berichts sind im Auftrag von KLIWA zunächst umfangreiche Auswertungen für die mittleren Abflüsse für die betrachteten Pegel (vgl. Abb. 13) durchgeführt worden, die hier selbst nicht oder nur in stark zusammengefasster Form dargestellt werden konnten. Diese sind in Form einer Ergänzung zum Klimamonitoringbericht 2016 auf der Internetseite von KLIWA [www.kliwa.de] als „Mittlerer Abfluss - Zusätzliche Auswertungen für das KLIWA-Untersuchungsgebiet“ zum Download verfügbar.

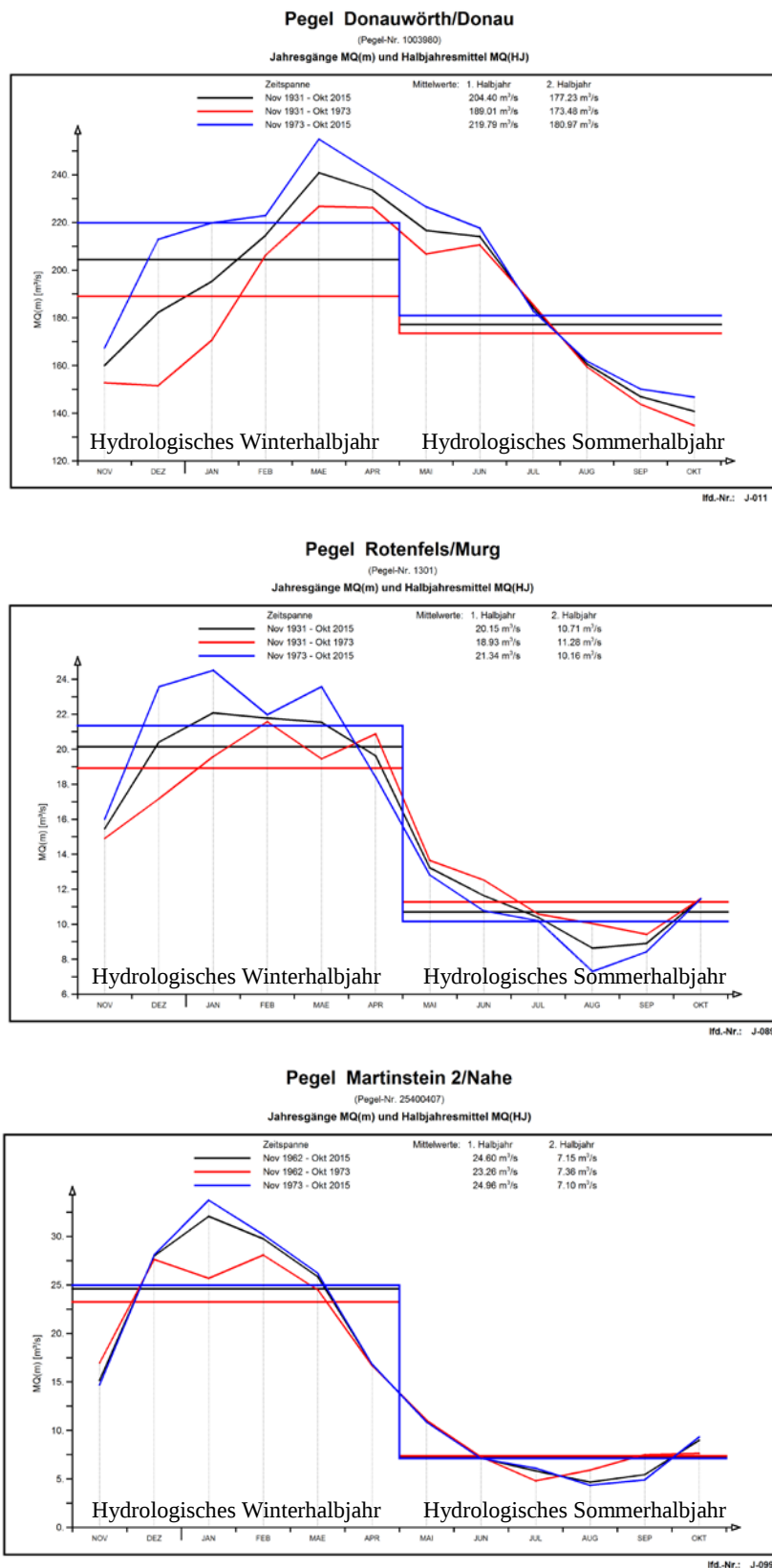


Abb. 20: Jahresgang des monatlichen mittleren Abflusses und der Halbjahresmittel am Beispiel der Pegel Donauwörth, Rotenfels und Martinstein 2 für die gesamte Zeitreihe und die beiden Teilzeitreihen 1931 bzw. 1962–1974 und 1974–2015.

9 Grundwasserstände und Quellschüttungen

9.1 Bisherige Auswertungen

Kenntnisse zum Langzeitverhalten von Grundwasserständen und Quellschüttungen sind von großer Bedeutung für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen. Erstmals wurden im Jahr 2008 127 Messstellen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, mit teilweise historisch langen Zeitreihen für den Zeitraum 1913 bis 2007, mit Hilfe statistischer Methoden untersucht und ausführlich dargestellt [KLIWA Heft 16]. Neben den Zeitreihen von Grundwasserstand und Quellschüttung wurden auch Klimakenngrößen in die Auswertung mit einbezogen, um mögliche statistische Zusammenhänge zwischen den hydrologischen und den meteorologischen Zeitreihen aufzudecken. Dabei ließen sich u.a. die nachfolgenden Erkenntnisse ableiten: Die Klimavariablen korrelierten signifikant mit den Grundwasserständen und Quellschüttungen. Bei vielen Messstellen traten signifikante Veränderungen hinsichtlich der Saisonalität auf. Das Maximum des Jahresgangs liegt innerhalb der Monate März bis Mai. Bei 45 % der Messstellen ist eine signifikante Tendenz zu einem früheren Auftreten des Maximums, bei 40 % der Messstellen eine Vergrößerung der Amplitude im Jahresgang festzustellen. Bei zwei Drittel der Messstellen zeigt sich über die jeweilige Gesamtbeobachtungszeit eine signifikante langfristige Tendenz zur Verringerung der mittleren Grundwasserstände und Quellschüttungen. Seit 1980 stehen Abnahmen und Zunahmen weitgehend im Gleichgewicht. Außerdem sind in den Wasserdargebotszeitreihen – wie auch in den Niederschlagszeitreihen – großskalige, etwa 4-, 8- und 15-jährige Periodizitäten für verschiedene Zeiträume detektierbar.

Diese statistischen Untersuchungen wurden zwischenzeitlich um den Zeitraum 2008 bis 2015 ergänzt. Die Ergebnisse an zwei Drittel der Messstellen haben sich, hinsichtlich eines früheren Auftretens des Maximums im Jahr sowie einer signifikanten langfristigen Tendenz zur Verringerung der mittleren Grundwasserstände und Quellschüttungen, im Wesentlichen bestätigt.

Zusätzlich liegen seit dem Jahr 2012 Daten zum Langzeitverhalten von Bodenwasserhaushaltsparametern und der Grundwasserneubildung über den Zeitraum 1951 bis 2010 als Ergebnis des Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW flächendeckend für Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz vor [GIT 2013]. Diese Auswertungen wurden zwischenzeitlich ebenfalls um den Zeitraum 2011-2015 aktualisiert [GIT 2015].

9.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung

Ziel der Auswertungen für einen wiederkehrenden Monitoringbericht ist es, ergänzend zu den o. g. umfangreichen statistischen Untersuchungen, an ausgewählten Zeitreihen Veränderungen im Grundwasser in ihrer aktuellen Entwicklung zu dokumentieren. Die klimatischen Unterschiede im Untersuchungsraum, die hydrogeologischen Eigenschaften der Grundwasserleiter, die Grundwasserflurabstände, die Bodenbedeckung und andere Einflussfaktoren wie z. B. der Pflanzenbewuchs, beeinflussen die Grundwasserneubildung und den -abfluss. Dementsprechend zeigen die beobachteten Messstellen eine sehr unterschiedliche Gangliniencharakteristik. Die „typische“ Grundwassermessstelle, mit der eine landesweit zutreffende Beschreibung der Grundwasserverhältnisse möglich ist, gibt es nicht.

Für die drei Bundesländer wurden exemplarisch vier Messstellen mit Standorten in unterschiedlichen hydrogeologischen Einheiten ausgewählt (Abb. 21 mit Lage der Messstellen), deren Grundwasserstands- oder Quellschüttungsganglinien auf Basis von Monatsmittelwerten für den Zeitraum 1951 bis 2015 in Abbildung 22 und 23 dargestellt sind. Die Ganglinien zeigen die vieljährigen Monatsmittelwerte und die jeweiligen aktuellen Monatsmittelwerte. Als farbcodierte Flächen werden Grundwasserdefizite (rot) bzw. Grundwasserüberschüsse (blau)

durch Vergleich der aktuellen Monatsmittelwerte zu den vieljährigen Monatsmittelwerten ausgewiesen. Eine Trendaussage ist auf Grundlage des im Diagramm eingetragenen Kurvenverlaufs der lokal gewichteten Regression sowie weiterer, nicht dargestellter Auswertungen möglich [IAWG 2016].

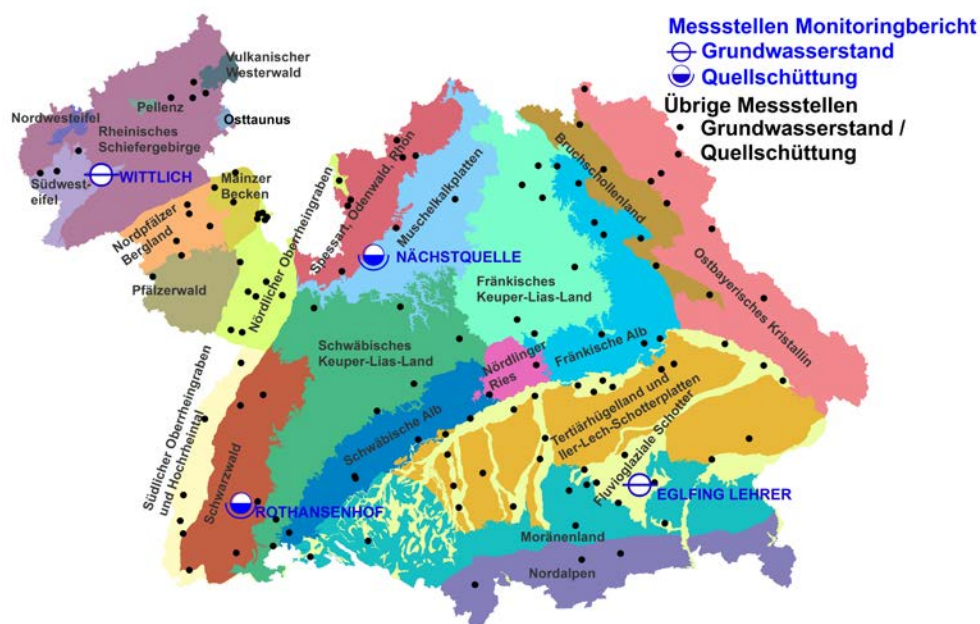


Abb. 21: Übersicht über die 25 hydrogeologischen Einheiten im KLIWA-Gebiet mit Lage der ausgewählten Grundwassermessstellen und Quellen.

9.3 Neue Ergebnisse

Die Ergebnisse an je zwei Grundwasserstandsmessstellen und Quellschüttungsmessstellen spiegeln beispielhaft den Grundwasserhaushalt für den Zeitraum 1951 bis 2015 im Umfeld dieser Messstellen wider. Gegenüber dem zweiten Monitoringbericht 2011 können nun auch Ergebnisse einer Langzeitsimulation des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung aus Niederschlag für die Periode 1951 bis 2015 als erklärende Variable herangezogen werden.

9.3.1 Grundwasserstände und Quellschüttungen

Vieljährige Monatsmittelwerte

Die Grundwasserneubildung findet vor allem im hydrologischen Winterhalbjahr (November bis April) während der Vegetationsruhe statt. Über das Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) überwiegt die Verdunstung, d. h. Sommerniederschläge füllen den Grundwasserspeicher nur im geringen Maß wieder auf. Daraus ergibt sich die typische jahreszeitliche Schwankung von Grundwasserständen und Quellschüttungen mit einem Anstieg im Winter und einem Absinken im Sommer. Eine Ausnahme bildet der Grundwasserleiter der Münchener Schotterebene, repräsentiert durch die Messstelle Eglfing Lehrer, Haar (Abb. 22a). Das zugehörige Grundwasserneubildungsgebiet liegt südlich von München und weist hohe Grundwasserflurabstände und damit lange Sickerzeiten auf, so dass die Grundwasserneubildung hier zeitverschoben über das Sommerhalbjahr stattfindet.

Die Schwankungsbreite des Grundwasserstands (Amplitude) hängt von den hydraulischen Eigenschaften des Bodens und des Speichergesteins (Aquifer) ab. Typisch für Porengrundwasserleiter ist das meist hohe nutzbare Speichervolumen mit einer geringen Schwankungsbreite so-

wie einem schwach ausgeprägtem Jahresgang des Grundwasserstandes (Abb. 22a); ähnliches gilt für den kombinierten Poren-/Kluftgrundwasserleiter in der Wittlicher Senke (Abb. 22b). Kluft- und Karstgrundwasserleiter mit geringem Speichervolumen verursachen eine große Schwankungsbreite der Jahresamplitude der Quellschüttungen (Abb. 23a und b). Änderungen von Grundwasserständen und Quellschüttungen unterliegen, neben den typischen jahreszeitlichen Schwankungen, auch einem vieljährigen Wechsel von „Nass“- und „Trockenperioden“.

Aktuelle Monatsmittelwerte der Periode 2011 bis 2015

Die zurückliegende Periode von 2011 bis 2015 zeigt in allen vier Ganglinien im Vergleich zum vieljährigen Monatsmittel vergleichsweise niedrige Grundwasserstände bzw. Quellschüttungen. Im Bereich der Münchener Schotterebene (Abb. 22a) bewegte sich der Grundwasserspiegel zunächst auf etwas überdurchschnittlichem Niveau und ging in den beiden letzten Jahren in den defizitären Bereich. Der Grundwasservorrat im Bereich der Messstelle Wittlich (Abb. 22b), an welcher von 2003 bis Ende 2013 der Grundwasserstand stets unter dem vieljährigen Mittel lag, hat sich durch die etwa durchschnittliche Grundwasserneubildung der letzten Jahre wieder erholt und befindet sich zwischenzeitlich auf einem mittleren Niveau.

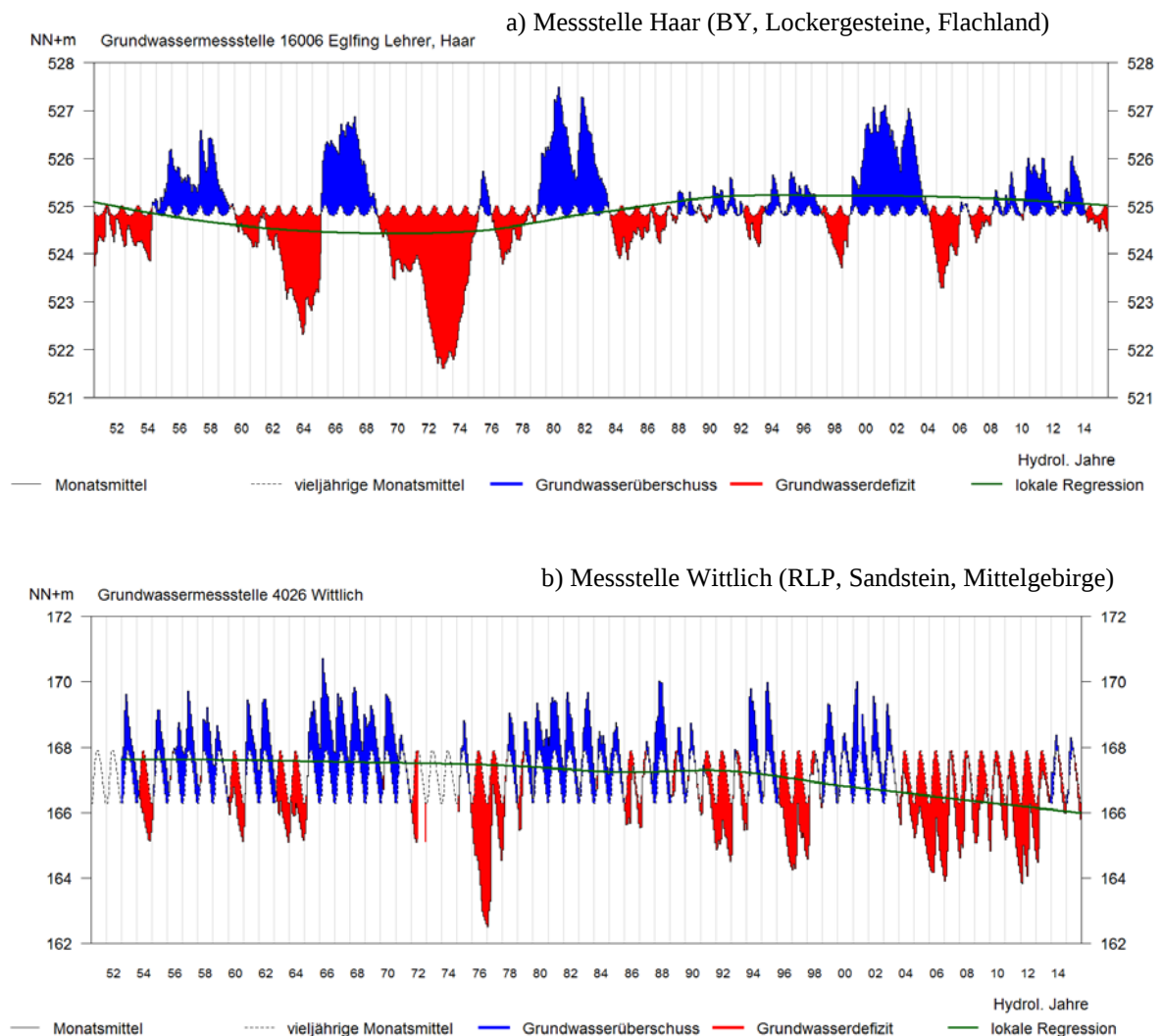


Abb. 22: Exemplarische Grundwasserstandsganglinien (a und b)



Die Rothansenhofquelle (Abb. 23a) wird aus einem vergleichsweise kleinen Einzugsgebiet ($< 1 \text{ km}^2$) im Kristallin des Südschwarzwalds gespeist. Die Schüttung schwankt zwischen 1 und 7 l/s. Aufgrund des kleinen Einzugsgebietes fällt die Schüttung auch in relativ nassen Jahren wie z. B. 2013 über das Sommerhalbjahr auf die Basisschüttung von rund 1 l/s. Die Nächstquelle (Abb. 23b) wird demgegenüber aus einem vergleichsweise großen Einzugsgebiet (ca. 30 km^2) im Muschelkalk des Odenwalds gespeist. Die Schwankungsbreite der Quellschüttung beträgt ca. 20 bis 110 l/s. Die dadurch entstehende Schwankungsdynamik zeigt, im Vergleich zu derjenigen des Grundwasserstandes, häufigere kurze Zeitabschnitte mit extrem niedrigen oder hohen Schüttungsmengen, wie z. B. im Jahr 2011. Beide durch die Quellen repräsentierten Grundwasservorkommen entwickelten sich im Jahr 2015 in defizitäre Verhältnisse hinein. An der Rothansenhofquelle wurden zum Jahresende 2015 hin mit Werten von deutlich unter 1 l/s die geringsten Schüttungen seit Beobachtungsbeginn gemessen.

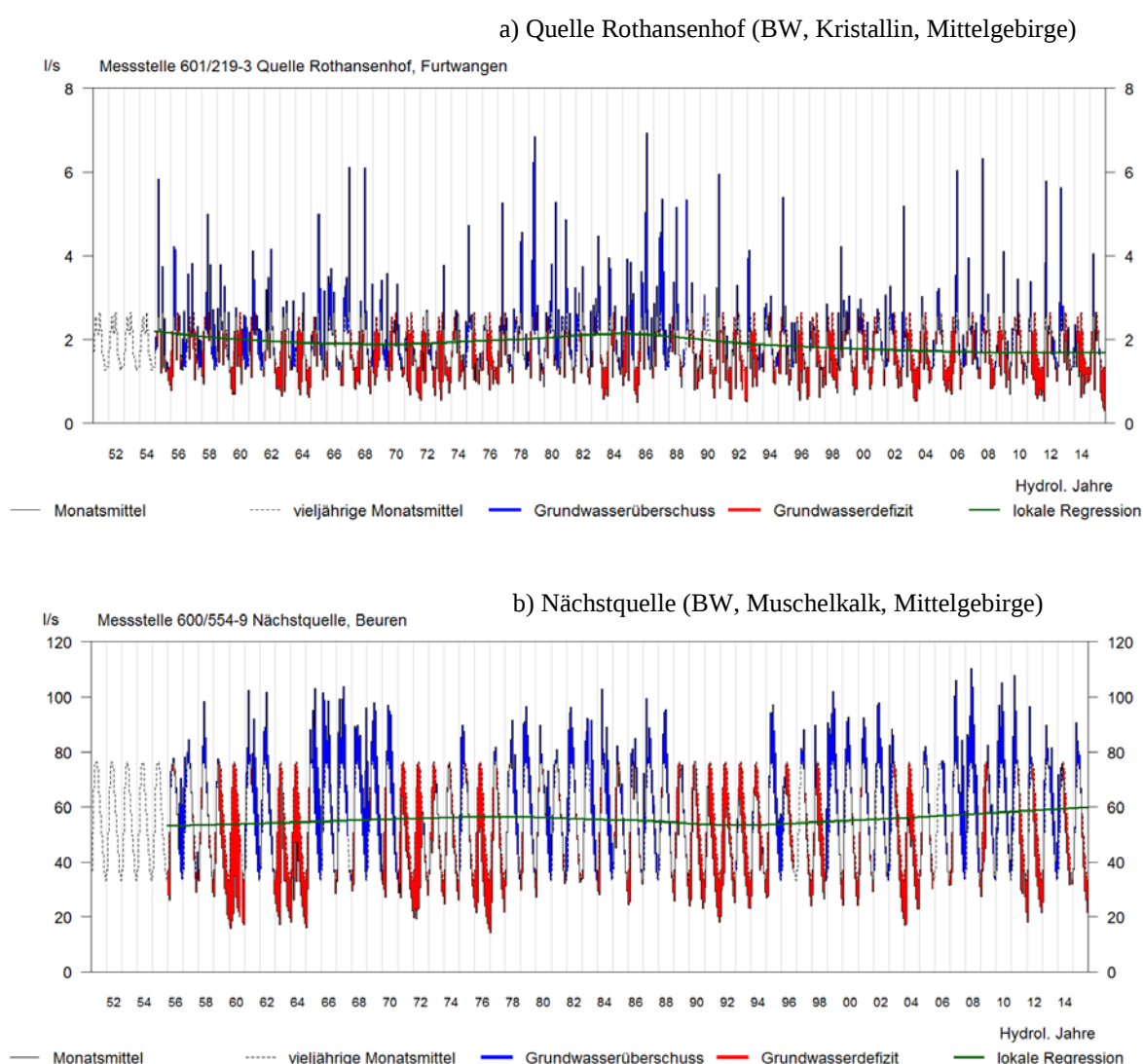


Abb. 23: Exemplarische Quellschüttungsganglinien (a und b)

Grundwasser- und Quellschüttungsschwankungen im Zeitraum 1951 bis 2015

In einem langen Beobachtungszeitraum wechselten sich Nass- und Trockenperioden immer wieder ab, dazwischen lagen Jahre mit mittleren Grundwasserverhältnissen. Diese Perioden lassen sich bei allen Ganglinien erkennen, kommen aber auf Grund des großen erschlossenen Grundwasserspeichers besonders deutlich an der Messstelle Eglfing Lehrer, Haar (Abb. 22a) zur Geltung. Zu beachten sind an dieser Messstellen z.B. während der beiden Trockenperioden von 1960 bis 1965 und von 1969 bis 1975 noch zusätzliche anthropogene Einflussfaktoren (Grundwasserentnahmen), welche die hydrologischen Faktoren überlagern. Klar ausgeprägt sind auch die Nassperioden 1979 bis 1983 sowie 1999 bis 2002. Nach 2003 zeichnen sich nur noch kleinere Trocken- und Nassperioden im Grundwasserstand ab. Bedingt durch die sehr ausgeprägten Niedrig- und Hochwasserperioden weist die Messstelle Eglfing Lehrer überwiegend wechselnde Tendenzen auf. Die lokal gewichtete Regression über den Gesamtzeitraum zeigt keinen eindeutigen Trend auf.

Die lokal gewichtete Regression für die Messstelle Wittlich (Abb. 22b) weist von den 1950er Jahren bis in die 1990er Jahre eine überwiegend ausgeglichene Tendenz auf. Anschließend ist sie bis zum Zeitreihenende durch eine deutlich fallende Tendenz charakterisiert.

Die Tendenz der Quellschüttungsganglinie Rothansenhof (Abb. 23a) weist über die gesamte Zeitreihe eine abnehmende Tendenz auf. Seit Beginn der 1990er Jahre zeigt sich eine weitestgehend ausgeglichene Tendenz auf einem insgesamt etwas niedrigeren Quellschüttungsniveau.

Die Quellschüttungsganglinie der Nächstquelle (Abb. 23b) weist über den Gesamtzeitraum eine überwiegend ausgeglichene Tendenz auf. Seit Beginn der 1990er Jahre bis zum Zeitreihenende ist eine leicht zunehmende Tendenz zu erkennen.

Das im Detail recht unterschiedliche Verhalten der hier dargestellten Ganglinien ist typisch für Beobachtungen im Grundwasser, da diese nicht allein von den lokalen klimatischen Bedingungen für die Grundwasserneubildung bestimmt werden. Prägend für die Reaktion des Grundwasserkörpers sind insbesondere die lokal und regional sehr unterschiedlichen hydrogeologischen Bedingungen wie Speichervolumen und hydraulische Eigenschaften sowie die räumliche Ausdehnung des jeweiligen Grundwasserleiters.

9.3.2 Langzeitsimulation von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung

Aktuelle Monatsmittelwerte im Zeitraum 2011-2015

Der beobachtete Rückgang der Grundwasserstände und Quellschüttungen der meisten Messstellen zeigt sich auch bei Betrachtung der jeweiligen mittleren landesweiten Sickerwasserraten im Zeitraum 2011 bis 2015 gegenüber dem 60-jährigen Mittel 1951 bis 2010 (Abb. 24). So betrug die mittlere jährliche Sickerwasserrate in Baden-Württemberg und Bayern nur 87 % vom langjährigen Mittel. In Rheinland-Pfalz erreichte sie sogar nur 81 %. Während einzig im Januar ein deutlicher Überschuss zwischen +39 % in Rheinland-Pfalz und +74 % in Bayern während der vergangenen fünf Jahren zu verzeichnen war, zeigte sich ein markanter Rückgang zwischen

-35 % in Bayern und -48 % in Rheinland-Pfalz während der Winter- und Frühlingsmonate (Februar bis Mai). Da in diesem Zeitraum ein Großteil der jährlichen Grundwasserneubildung generiert wird, hat diese jüngste Entwicklung weitreichende Auswirkungen auf die Grundwasserstände. Dies spiegelt sich auch in den gezeigten Grundwasserständen und Quellschüttungen der Abbildungen 22 und 23 wieder.

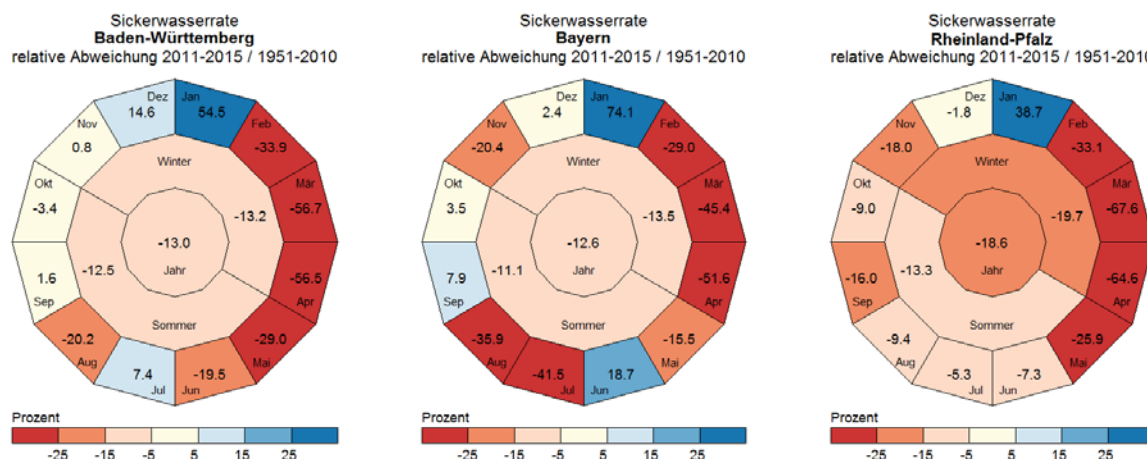


Abb. 24: Mittlere innerjährliche relative Änderung der Sickerwasserrate auf der Fläche der drei KLIWA Länder. Vergleich des Zeitraums 2011–2015 mit dem vieljährigen Mittel 1951–2010. Angaben in % über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

Grundwasserneubildung aus Niederschlag im Zeitraum 1951–2015

In Abbildung 25 sind für die hydrogeologischen Einheiten (a) Südwesteifel, (b) fluvioglaziale Schotter, (c) Schwarzwald und (d) Muschelkalkplatten, die jährlichen Grundwasserneubildungshöhen für den Zeitraum 1951 bis 2015 dargestellt. Die hydrogeologischen Einheiten entsprechen den zugeordneten, repräsentativen Messstellen (vgl. Abb. 21). Während in früheren Dekaden immer wieder auch neubildungsreiche Jahre (>75-Perzentil) zu verzeichnen waren, beginnt mit dem Hitze- und Trockenjahr 2003 in allen vier Bereichen eine nunmehr 13-jährige Periode mit geringerer jährlicher Variabilität und vor allem ohne überdurchschnittliche Grundwasserneubildung. In der jüngsten Abfolge von durchschnittlichen Jahren seit 2003 (25- bis 75-Perzentil) treten immer wieder trockene, d.h. neubildungsarme Jahre (<25-Perzentil) in regional unterschiedlicher Ausprägung auf. Am häufigsten ist dies im Bereich der fluvioglazialen Schotter und im Schwarzwald der Fall.

Perzentile sind ein Lagemaß der Statistik und beschreiben einen Schwellenwert einer Wertemenge. Das 25. Perzentil definiert somit einen Schwellenwert, unter dem 25 Prozent aller Werte liegen. Die verbleibenden 75 Prozent der Wertemenge sind demnach größer.

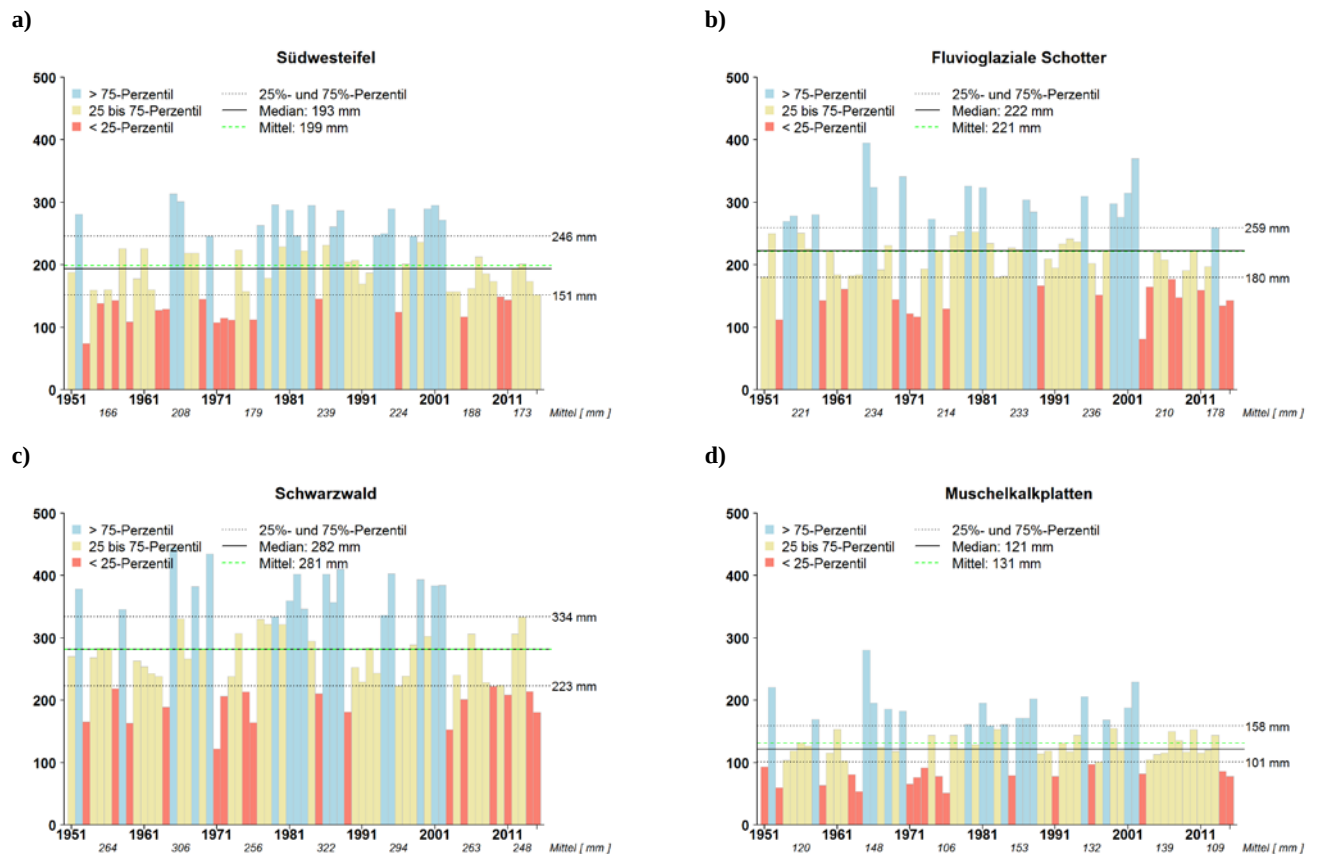


Abb. 25: Entwicklung der jährlichen Grundwasserneubildung aus Niederschlag in der Südwesteifel (a) im Bereich fluvioglazialer Schotter (b), im Schwarzwald (c) und im Bereich der Muschelkalkplatten (d) im Zeitraum 1951-2015 Angaben in mm/a.



10 Langzeitverhalten im Bodensee

10.1 Wasserstand

Auch wenn sich im Jahr 1999 im Bodensee das größte Hochwasser seit dem 19. Jahrhundert ereignete, zeigt der mittlere Wasserstandsverlauf in den letzten Jahrzehnten ein Absinken der jährlichen sommerlichen Höchstwasserstände des Bodensees auf. Die sommerlichen Pegelwerte lagen im Zeitraum seit 1990 ca. 20–30 cm tiefer als in den 30 Jahren zuvor (Abb. 26). Zu dieser Veränderung trägt die Abnahme der Schneespeicherung im alpinen Einzugsgebiet [KLIWA Heft 6] auf Grund der tendenziell wärmeren Winter bei. Diese führt im Frühjahr und Sommer zu geringeren Schmelzwassermengen. Weitere mögliche Einflussfaktoren können Veränderungen der Verdunstung oder der Niederschlagsmengen im Einzugsgebiet sein. Von November bis Januar waren die mittleren Wasserstände dahingegen ca. 10 cm höher als im Zeitraum vor 1990, wofür die verringerte Schneespeicherung im Einzugsgebiet und der somit erhöhte winterliche Abfluss ebenfalls eine plausible Erklärung sind.

Die veränderten Wasserstände sind im Bodensee vor allem für die Ufer- und Flachwasserbereiche von Bedeutung, aber auch für die über das Grundwasser an den Bodenseewasserstand angekoppelten Feuchtgebiete. Strömungen, Wellenwirkung, Erosions- und Sedimentationsprozesse, Wasseraustausch, aber auch die Temperaturverhältnisse im Flachwasser sind von den Wasserständen abhängig, ebenso wie die Lebensraumbedingungen für Flora und Fauna. Mit den veränderten Wasserständen sind folglich Veränderungen in den ufernahen Ökosystemen zu erwarten.

Die Wasserstände spielen aber auch für verschiedene Nutzungen des Sees durch den Menschen eine wichtige Rolle, wie insbesondere den Boots- und Schiffsverkehr. Bei sommerlichen Niedrigwasserphasen wird dieser mitunter behindert, wenn beispielsweise Anlegestellen nicht mehr angefahren werden können.

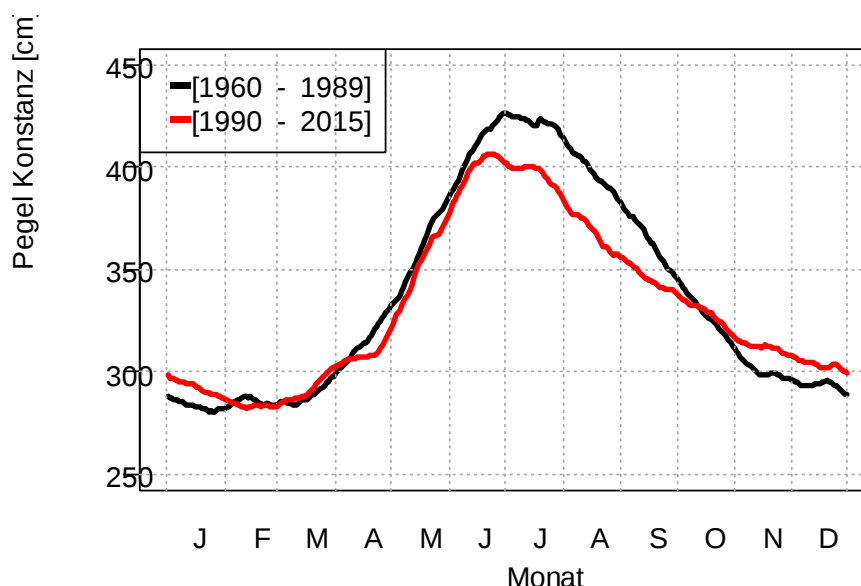


Abb. 26: Der mittlere Jahresverlauf der Bodensee-Pegelwerte bei Konstanz seit den 1990er Jahren (rot) im Vergleich zum mittleren Verlauf von 1960–1989 (schwarz).

10.2 Temperatur und Durchmischung

Die klimatische Erwärmung spiegelt sich in der Temperaturentwicklung am und im Bodensee wieder. Sowohl die Lufttemperaturen der DWD Messstation in Konstanz als auch die oberflächennahen Wassertemperaturen im Bodensee zeigen eine deutliche Zunahme auf (Abb. 27). Die Jahresmittelwerte der Lufttemperaturen lagen seit den 1990er Jahren im Durchschnitt um $+1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ höher als in den rund 3 Jahrzehnten davor, die Wassertemperaturen waren $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ wärmer. Die linearen Trends von 1962 bis 2015 betragen für die Wassertemperatur $+0,03^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$ und für die Lufttemperatur $+0,04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Jahr}$. Ansteigende Temperaturtrends wurden auch für viele andere europäische Seen aufgezeigt und werden ebenso im Untersee des Bodensees beobachtet.

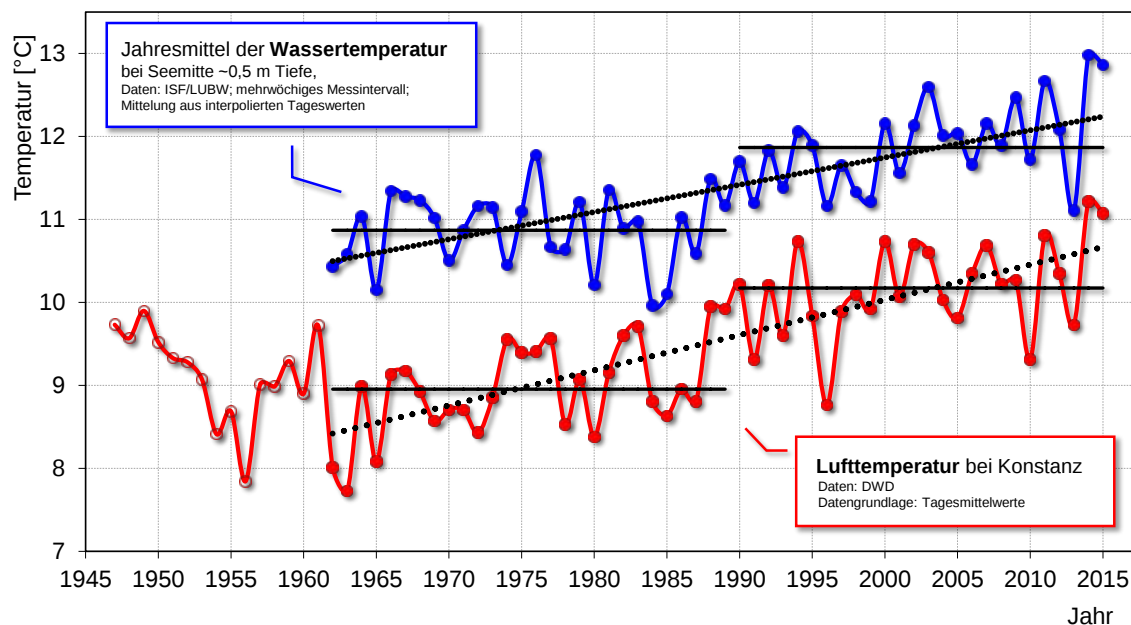


Abb. 27: Jahresmittel der Lufttemperaturen bei Konstanz (rot) und der Temperaturen im Oberflächenwasser bei der Seemitte des Bodensee-Obersees (blau).

Die Temperaturverhältnisse im Bodensee haben direkten Einfluss auf viele hydrobiologische und hydrochemische Vorgänge. Sie sind zudem maßgeblich für die Schichtungs- und Durchmischungsvorgänge und somit für den vertikalen Stofftransport. Da die Erwärmungstrends in den oberen Schichten stärker sind als in den tieferen Schichten hat sich die Schichtungsstabilität erhöht, was zu einer Abschwächung des vertikalen Austauschs beiträgt. Von Bedeutung für die Abläufe im See ist jedoch besonders die winterliche tiefgreifende Durchmischung. Diese befördert einerseits Sauerstoff in das Tiefenwasser, welcher dort durch mikrobielle Abbauprozesse allmählich gezehrt wird. Andererseits bringt sie Nährstoffe aus der Tiefe in die Deckschicht des Sees. Mit den tendenziell wärmeren Wintern hat sich der Tiefenwasseraustausch zunehmend verschlechtert und es treten häufiger mehrjährige Phasen auf, in welchen das Tiefenwasser nur unzureichend mit sauerstoffreicherem Wasser aus den oberen Schichten durchmischt wird. Dies spiegelt sich auch in der Durchmischung anderer Wasserinhaltsstoffe wieder (Abb. 28), wie etwa dem Orthophosphat, welches sich durch das Absinken von Biomasse im Tiefenwasser anreichert. Bei schwacher Durchmischung wird weniger Orthophosphat zurück in die Deckschicht befördert, wo es als Nährstoff für das Plankton von Bedeutung ist.



Die Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser sind durch den schwächeren vertikalen Austausch bislang noch nicht auf kritische Werte gesunken, da es durch Maßnahmen der Abwasserreinigung und der Reduzierung von diffusen Nährstoffeinträgen gelungen ist, den See in seinen natürlicher Weise nährstoffarmen Zustand zurückzuführen. Dennoch sind die Auswirkungen eines reduzierten Tiefenwasseraustauschs erkennbar und so wurde im Herbst 2015 an der tiefsten Stelle des Sees, etwa 1 m über Grund, erstmals seit 21 Jahren wieder eine Sauerstoffkonzentration unter 6 mg/l gemessen.

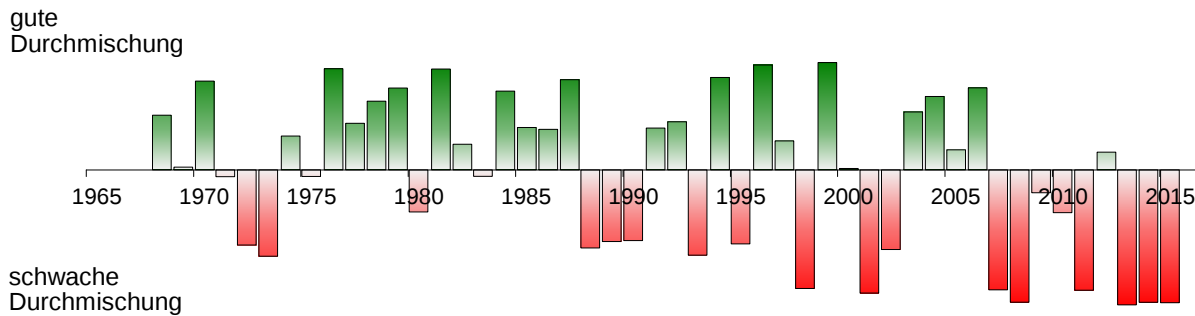


Abb. 28: Der Durchmischungsindex zeigt an, wie wirksam die winterliche Durchmischung zum Ausgleich vertikaler Konzentrationsunterschiede von Wasserinhaltsstoffen (hier von Orthophosphat) beigetragen hat. Die Zeitreihe von 1968–2015 liefert damit auch eine Information über die langjährigen Veränderungen des winterlichen Tiefenwasseraustauschs.

11 Voraussetzungen für das weitere Klimamonitoring

Die vorliegenden Ergebnisse und Erkenntnisse des Monitorings zum Klimawandel und dessen Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft basieren auf umfangreichen Auswertungen, die vorstehend zusammenfassend dargestellt sind. Grundlage dieser Monitoring-Ergebnisse sind zahlreiche lange Messreihen, die ab etwa 1930 in einer solchen Zahl vorliegen, dass regionale Auswertungen durch Zusammenfassung von Stationsreihen und damit belastbare regionale Veränderungsaussagen möglich sind. Für die Zeit vor 1930 liegen ebenfalls Messreihen vor, allerdings in deutlich geringerem Umfang, so dass sich diese allenfalls für stationsbezogene Auswertungen eignen.

Die dargestellten Fakten und daraus abgeleiteten Erkenntnisse beruhen auf Messnetzen, die von Vorgängerinstitutionen in früheren Jahrzehnten vorausschauend eingerichtet wurden und die seit Jahrzehnten betrieben werden. Gleichwohl ist aus fachlicher Sicht immer wieder zu bedauern, dass nicht mehr Messungen vorliegen. Aus dieser Erfahrung heraus wird auch weiterhin die fachliche Notwendigkeit gesehen, die bestehenden hydrologischen und meteorologischen Messnetze im bestehenden Umfang kontinuierlich und langfristig fortzuführen. Sie sind hinsichtlich der heutigen und zukünftigen fachlichen Anforderungen zu optimieren und in erforderlichem Maße weiter auszubauen.

Das Auswerten von möglichst langen, lückenlosen Messreihen meteorologischer und hydrologischer Klimaparameter aus flächendeckenden Messnetzen ist die Grundlage für ein wissenschaftlich quantifizierbares Erfassen von Veränderungen. Dies gilt insbesondere auch für ein Klimamonitoring. So können längerfristig ablaufende Veränderungen im Klimasystem und im Wasserkreislauf nachvollziehbar erfasst werden. Die regelmäßigen Auswertungen zur Erfassung der laufenden Veränderungen dienen auch als Grundlage und Referenz für die Beurteilung der kommenden regionalen Veränderungen von Klima und Wasserhaushalt.

Ohne umfassende Messdaten sind eine Weiterentwicklung von Modellen im Klimabereich und der Wettervorhersage sowie die sachgerechte Nutzung von Wasserhaushaltsmodellen in der heute erforderlichen Qualität nicht möglich. Die Kooperationspartner von KLIWA halten es daher für notwendig, das etablierte Klimamonitoring gesichert weiter zu führen. Mit KLIWA-Monitoringberichten sollen auch weiterhin Ergebnisse und Erkenntnisse zum Klimawandel in Süddeutschland dokumentiert werden.





12 Literaturverzeichnis

- GIT 2013: Langzeitsimulation von Bodenwasserhaushalt und flächenhafter Grundwasserneubildung 1951-2010, GIT Hydros Consult, Freiburg, 2013.
- GIT 2016: Fortführung der KLIWA Langzeitsimulation von Bodenwasserhaushalt und flächenhafter Grundwasserneubildung für die Jahre 2011-2015, GIT Hydros Consult, Freiburg, 2016.
- IAWG 2016: Fortschreibung der Trendauswertungen an Grundwasser-Messstellen und Quellen, IAWG, Ottobrunn, 2016.
- IPCC 2014: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen [Hauptautoren, R.K. Pachauri und L.A. Meyer (Hrsg.)]. IPCC, Genf, Schweiz. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn 2015
- KLIWA Heft 2: Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern, 98 S., ISBN 978-3-88251-284-9, Karlsruhe 2002
- KLIWA Heft 3: Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse in Baden-Württemberg und Bayern, 93 S., ISBN 978-3-8851-286-5, Karlsruhe 2003
- KLIWA Heft 5: Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern, 76 S., ISBN 978-3-937911-17-0, München 2005
- KLIWA Heft 6: Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern, 88 S., ISBN 978-3-937911-18-9, München 2005
- KLIWA Heft 7: Langzeitverhalten des Gebietsniederschlages in Baden-Württemberg und Bayern, 160 S.; ISBN 978-3-937911-19-7, München 2005
- KLIWA Heft 8: Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern, 93 S., ISBN 978-3-88148-412-4, Offenbach 2006
- KLIWA Heft 11: Zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee, 99 S., ISBN 978-3-88251-326-4, Karlsruhe 2007
- KLIWA Heft 12: Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung sowie von Verdunstung und klimatischer Wasserbilanz in Baden-Württemberg und Bayern, 147 S., ISBN 978-3-88148-429-9, Offenbach 2008
- KLIWA Heft 16: Langzeitverhalten von Grundwasserständen und Quellschüttungen, ISBN 978-3-88251-362-2, Karlsruhe 2011
- KLIWA 2008: Monitoringbericht 2008: Klimawandel in Süddeutschland, Veränderung der Kenngrößen Lufttemperatur, Niederschlag und Hochwasserabfluss – Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA, 24 S., veröffentlicht auf der Internetseite www.kliwa.de 2008
- KLIWA 2011: Monitoringbericht 2011: Klimawandel in Süddeutschland, Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen – Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA, 40 S., veröffentlicht auf der Internetseite www.kliwa.de 2011
- KOSTRA-DWD-2010: Starkniederschlagshöhen für Deutschland: Bezugszeitraum 1951-2010, KOSTRA-DWD-2010. Abschlussbericht. Deutscher Wetterdienst – Hydrometeorologie, Offenbach; siehe auch http://www.dwd.de/DE/leistungen/starkniederschlagsgutachten/download/kostra_dwd_2010_pdf.html

-
- Maier, U. & Müller-Westermeier, G.: Verifikation klimatologischer Rasterfelder, Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 235, Offenbach 2010
- Müller-Westermeier, G.: Numerisches Verfahren zu Erstellung klimatologischer Karten, Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 193, Offenbach 1995
- RADOLAN 2009: Weigl, E. und Winterrath, T.: Radargestützte Niederschlagsanalyse und – vorhersage (RADOLAN, RADVOR-OP) aus promet 35. Jahrgang, Heft 1-3
Instrumente der Wettervorhersage im Deutschen Wetterdienst, S. 78-86;
siehe auch <http://www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radolan.html>



Herausgeber:

Arbeitskreis KLIWA

- Deutscher Wetterdienst;
- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg;
- Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz;
- Bayerisches Landesamt für Umwelt

Weitere aktuelle Informationen zu diesem Monitoringbericht, weiteren Heften und anderen Projektergebnissen finden Sie auf unserer Internetseite:

<http://www.kliwa.de>