



Klimawandel in Süddeutschland

Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen

Klimamonitoring im Rahmen der Kooperation KLIWA



Monitoringbericht 2021



Inhaltsverzeichnis

| | Seite |
|---|-----------|
| Zusammenfassung | 4 |
| 1 Außergewöhnliche und extreme Ereignisse 2016–2021 | 8 |
| 1.1 Lufttemperatur | 8 |
| 1.2 Niederschlag | 8 |
| 1.3 Hochwasser..... | 12 |
| 1.4 Niedrigwasser | 13 |
| 1.5 Boden- und Grundwasserhaushalt | 14 |
| 2 Klimamonitoring im Rahmen der KLIWA-Kooperation | 16 |
| 3 Methodisches Vorgehen | 18 |
| 4 Lufttemperatur | 21 |
| 4.1 Bisherige Auswertungen..... | 21 |
| 4.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung | 21 |
| 4.3 Neue Ergebnisse | 22 |
| 5 Niederschlag | 28 |
| 5.1 Bisherige Auswertungen..... | 28 |
| 5.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung | 28 |
| 5.3 Neue Ergebnisse | 29 |
| 6 Hochwasserabflüsse | 35 |
| 6.1 Bisherige Auswertungen..... | 35 |
| 6.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung | 35 |
| 6.3 Neue Ergebnisse | 37 |
| 7 Niedrigwasserabflüsse | 44 |
| 7.1 Bisherige Auswertungen..... | 44 |
| 7.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung | 44 |
| 7.3 Neue Ergebnisse | 46 |
| 8 Mittlere Abflüsse | 51 |
| 8.1 Bisherige Auswertungen..... | 51 |
| 8.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung | 51 |
| 8.3 Neue Ergebnisse | 53 |
| 9 Grundwasserstände und Quellschüttungen | 60 |
| 9.1 Statistische Untersuchung des Langzeitverhaltens | 60 |
| 9.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung | 61 |
| 9.3 Neue Ergebnisse | 62 |
| 9.3.1 Grundwasserstände und Quellschüttungen | 62 |
| 9.3.2 Langzeitsimulation von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung .. | 65 |
| 10 Gewässerökologie | 69 |
| 10.1 Gewässerökologisches Klimafolgenmonitoring | 69 |
| 10.2 Temperatur und Durchmischung des Bodensees..... | 72 |
| 11 Voraussetzungen für das weitere Klimamonitoring | 75 |
| 12 Literaturverzeichnis | 76 |



Impressum

Bearbeitung: Kooperation KLIWA – www.kliwa.de

Redaktion:

Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz

Kaiser-Friedrich-Str. 7
55116 Mainz

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg

LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg

Griesbachstraße 1
76185 Karlsruhe

Deutscher Wetterdienst

Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach am Main

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Rheingaustraße 186
65203 Wiesbaden

Ministerium für Umwelt und Verbraucherschutz des Saarlandes

Keplerstr. 18
66117 Saarbrücken

Bilder Frontseite:

Oben: Der Pegel Altenahr an der Ahr nach dem Hochwasser 2021
Struktur- und Genehmigungsdirektion Nord

Mitte: Algenblüte der Cyanobakterien (Blaualgen) an der Mosel
LfU RP, Dr. Jochen Fischer

Unten: Blautopf in Blaubeuren
Foto: Christian Iber

Korrigierte Version vom 23.12.2021 / Änderung Kap. 10, Tab. 4, Abb. 51

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

Zusammenfassung

Seit über 20 Jahren gibt es die Länderkooperation KLIWA, in der die Länder Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz gemeinsam Fragestellungen des Klimawandels und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft im Süddeutschen Raum bearbeiten. Ein wichtiger Baustein von KLIWA ist das Klimamonitoring, mit dem verschiedene relevante meteorologische und hydrologische Kenngrößen in ihrer zeitlichen Entwicklung erfasst und in regelmäßigen Abständen zeitnah ausgewertet werden. Damit lassen sich die Auswirkungen des Klimawandels verfolgen und langfristige Trends erkennen. Diese Auswertungen werden in Klimamonitoringberichten veröffentlicht, die in der Regel alle fünf Jahre fortgeschrieben werden. Bisher sind die Ergebnisse als KLIWA-Hefte 2, 3, 5-8 sowie später als Monitoringberichte in den Jahren 2008, 2011 und 2016 veröffentlicht worden.

Mit diesem aktuellen Klimamonitoringbericht 2021 werden Veränderungen des regionalen Klimas und des Wasserhaushalts in den KLIWA-Kooperationsländern sowie bei einem Teil der Größen auch erstmals zusätzlich in einem erweiterten KLIWA-Gebiet mit den Gastbundesländern Hessen und dem Saarland bis zum Jahre 2020 dokumentiert und bewertet. Zusätzlich werden außergewöhnliche und extreme Ereignisse des Zeitraums 2016–2021 dargestellt und bewertet.

Die Kernaussagen zur Klimaentwicklung in Süddeutschland lassen sich für die einzelnen Kenngrößen, die den Wasserhaushalt steuern, folgendermaßen zusammenfassen:

Lufttemperatur

- Im Zeitraum 2016 bis 2020 zeigt sich für die Lufttemperatur weiter eine vermehrte Anzahl an überdurchschnittlich warmen Jahren, inklusive Hitzeperioden und extrem hohen Temperaturen. Die Jahre 2018 bis 2020 gehören zu den wärmsten gemessenen Jahren bundesweit und im erweiterten KLIWA-Gebiet seit Beginn flächendeckender Messungen in 1881.
- In den Jahren 2016 bis 2020 hat sich der Anstieg der Lufttemperatur im Jahresmittel in Süddeutschland weiter fortgesetzt. Für den Zeitraum 1931 bis 2020 ist eine Zunahme des Gesamttrends über 90 Jahre auf +1,4 bis +1,8 °C sowie eine Verstärkung der Trendsignifikanz festzustellen.
- In den fünf Jahren 2016 bis 2020 ist eine deutliche Zunahme der Durchschnittstemperaturen von im Mittel 0,3 °C gegenüber den Jahren 2011 bis 2015 zu verzeichnen.
- 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. 20 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: +1,6 bis +2,1 °C/90 Jahre; Sommerhalbjahr: +1,1 bis +1,6 °C/90 Jahre).
- Für den Zeitreihenvergleich 1951 bis 2020 gegenüber 1931 bis 2000 ergibt sich in allen KLIWA-Regionen eine weitere Verstärkung des bisher schon positiven Trends, sowohl für das Gesamtjahr als auch die hydrologischen Halbjahre. Ebenso zeigt sich eine generelle Zunahme der Signifikanz der Trends bis zum Jahr 2020 in allen Regionen zu hochsignifikanten Trends.

Niederschlag

- Die Trends (1931–2020) der mittleren Gebietsniederschlagshöhe sind insgesamt schwächer und weniger signifikant als im letzten ausgewerteten Zeitraum (1931 bis 2015), wobei es mehrheitlich positive und häufiger signifikante Trends im Winterhalbjahr (-6 % bis +22 %) und keine eindeutigen kaum signifikanten Entwicklungen im Sommerhalbjahr (-15 % bis +3 %) gibt. In den letzten 20 Jahren ist vor allem eine Abschwächung der positiven 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

- Für den Zeitraum 1932 bis 2020 ergeben sich im KLIWA-Untersuchungsgebiet bei 55 % der Pegel Trends zu steigenden Hochwasserabflüssen im Gesamtjahr. Dies gilt in gleicher Weise für das hydrologische Winterhalbjahr (58 % der Pegel) und in abgeschwächter Form im Sommerhalbjahr (45 % der Pegel). Von den ermittelten Zunahmen ist etwa die Hälfte der Trends signifikant.
- Der Vergleich unterschiedlich langer Zeiträume zeigt für das hydrologische Winterhalbjahr eine Zunahme an positiven Trends bis 2005. Danach kommt es zu einer Abnahme an positiven Trends.
- 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 Jahr 2018 sowie in Teilen des KLIWA-Gebiets auch im Jahr 2019 als Folge von extremer Trockenheit auf. Besonders betroffen war im Jahr 2018 der Rhein mit Rekordniedrigwasserständen an einer Vielzahl von Pegeln. Die Abflüsse am Rhein bewegten sich 2018 jedoch nicht im Bereich historischer Rekorde.
- Insgesamt zeigt sich für die jährlichen Niedrigstwasserabflüsse (Tageswerte) eine ausgeglichene Verteilung von zunehmenden und abnehmenden Trends für den Zeitraum 1951 bis 2020. Gegenüber dem Zeitraum bis 2015 hat die Anzahl positiver Trends deutlich abgenommen. Es zeigt sich, dass die Verlängerung der Zeitreihe bis 2020 einen großen Einfluss hat. Eine eindeutige Tendenz ist jedoch nicht abzulesen, da die ermittelten Veränderungen mehrheitlich nicht signifikant sind.
- Für die jährlichen 7-Tages-Mittel-Niedrigstwasserabflüsse zeigt sich durch die Verlängerung der Zeitreihe insgesamt eine Trendumkehr. Die Mehrzahl an Pegeln weist nun eine abnehmende Tendenz auf.
- Werden die Zeitreihen von 1951 auf 1974 verkürzt, so wird die abnehmende Tendenz der Niedrigstabflusswerte NQ(J) und NM7Q(J) noch deutlicher.



- 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 2020 im Gesamtjahr die Trends relativ ausgeglichen sind. Im Winterhalbjahr hingegen überwiegen die Pegel mit steigenden Abflüssen (61 % der Pegel), während im Sommerhalbjahr an 76 % der Pegel mehrheitlich abnehmende Abflüsse zu beobachten sind. Von den ermittelten Veränderungen sind im Durchschnitt 40 % bis 50 % signifikant.
- Im Vergleich lassen sich für die Zeiträume 1932 bis 2000, 1932 bis 2005, 1932 bis 2010, 1932 bis 2015 und 1932 bis 2020 Unterschiede erkennen. Durch die Zeitreihenverlängerung bis 2020 geht die Anzahl der Pegel mit zunehmenden Trends vor allem im Gesamtjahr aber auch im Winterhalbjahr 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 Tendenz schwächt sich allerdings aufgrund der Zeitreihenverlängerung ab. Im Sommerhalbjahr ist dagegen insgesamt betrachtet eine kontinuierliche Abnahme der mittleren Abflüsse vorhanden.

Grundwasserstände und Quellschüttungen

- Von 123 untersuchten Messstellen mit sehr langen Beobachtungsreihen in den KLIWA-Ländern weisen über 80 % für die jeweilige Gesamtzeitspanne bis 2020 eine Tendenz hin zu niedrigeren Grundwasserständen und Quellschüttungen auf.
- 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 2020, häufig in den Monaten März bis Mai auf. Ermittelt man diesen Zeitpunkt gleitend über die jeweilige Gesamtzeitreihe, so zeigt sich bei etwa der Hälfte 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 2020 mit durchschnittlichen bis sehr trockenen, d. h. Neubildungsarmen Jahren, eine geringe Variabilität in regional unterschiedlicher Ausprägung auf. Besonders deutlich zeigt sich diese Entwicklung während der vergangenen 5 Jahre (2016–2020). In diesem Zeitraum betrug die mittlere jährliche Grundwasserneubildung in Süddeutschland nur ca. 80 % vom langjährigen Mittel.

Gewässerökologisches Klimafolgenmonitoring

- Im Jahr 2018 wurde das gewässerökologische Klimafolgenmonitoring für Fließgewässer und Seen gestartet.

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 große Bedeutung und Notwendigkeit des Klimamonitorings deutlich aufzeigen. Aus den Bestandsaufnahmen zu den verschiedenen Kenngrößen kann gefolgert werden, dass sich der Klimawandel in Süddeutschland deutlich bemerkbar macht und weiter fortsetzt.

Eine Fortführung des Klimamonitorings ist ein erklärtes Ziel im Rahmen der KLIWA-Kooperation. Das setzt weiterhin flächendeckende meteorologische, hydrologische und gewässerökologische Messnetze voraus, mit denen langfristig und kontinuierlich Messdaten gewonnen werden. Sie sind zudem hinsichtlich der heutigen und zukünftigen fachlichen Anforderungen stetig 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 2016–2021

In dem vorliegenden Monitoringbericht werden außergewöhnliche und extreme Ereignisse im Zeitraum 2016 bis 2021 dargestellt. Ergänzend zu den Trendbetrachtungen mit der fortschreitenden Aktualisierung um 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 der langjährigen Zeitreihen. In diesem Kapitel werden Extreme der hydrometeorologischen Größen Lufttemperatur, Niederschlag, Hochwasser, Niedrigwasser und Grundwasser basierend auf Auswertungen der einzelnen Bundesländer und des DWD betrachtet. Die hier aufgeführten Ereignisse 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 2006, KLIWA 2019a] und Niedrigwasserverhältnissen [KLIWA 2009, KLIWA 2017] durchgeführt.

1.1 Lufttemperatur

Im Zeitraum 2016 bis 2021 zeigt sich für die Lufttemperatur vor allem eine weitere Anzahl an warmen Jahren inklusive Hitzeperioden und extrem hohen Temperaturen. Drei von fünf Jahren (2018, 2019 und 2020) bilden die drei wärmsten Jahre in Deutschland und in den KLIWA-Bundesländern seit Beginn flächendeckender Messungen in 1881.

Im Jahr 2018 waren die Monate April und Mai die wärmsten seit Beginn der regelmäßigen Messungen. Zusätzlich wurde für die Sonnenscheindauer ein neuer Rekord aufgestellt. Dies führte unter anderem dazu, dass 2018 mit einer Mitteltemperatur von 10,5 °C das wärmste Jahr seit Beginn der flächendeckenden Messungen war. In Süddeutschland war es um 2,0 °C wärmer als im langjährigen Mittel.

Das Jahr 2019 verlief sowohl in Deutschland, als auch in den KLIWA-Bundesländern erheblich zu warm. So war der Juni der wärmste seit Beobachtungsbeginn, was zu Temperaturrekorden an verschiedenen Messstationen führte. Mit einer Mitteltemperatur von 10,3 °C war das Jahr 2019 das bisher drittwärmste in Deutschland.

Das Jahr 2020 war mit einer mittleren Temperatur von 10,4 °C das zweitwärmste Jahr in Deutschland seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1881.

1.2 Niederschlag

Bei der Betrachtung des Niederschlags bezüglich Extreme 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 Starkregenereignisse schwer erfassbar. Die sehr hohen, aber häufig auch sehr kleinräumigen Niederschläge, die bei konvektiven Wetterlagen auftreten, werden in Abhängigkeit von der Dichte des Messnetzes vielfach nicht erfasst. Dies ist bei der Betrachtung dieser Extremereignisse zu beachten. Zusätzliche flächenhafte Informationen kann hierbei die Messung des Niederschlags mit Hilfe von Radar liefern, wo es mit der RADAR-Klimatologie [WINTERRATH ET AL. 2017] und dem Ereigniskatalog CatRaRe [LENGFELD ET AL. 2021] schon vielfältige Auswertungen der 20jährigen Messungen gibt.

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; kann aber auch großräumig über einen längeren Zeitraum auftreten, was einen fließenden Übergang zum Dauerregen bildet. Die Jahre 2016 bis 2021 waren geprägt durch eine Vielzahl von meist lokal begrenzten Starkregenereignissen in den KLIWA-Bundesländern. Prägend waren zudem extreme Stark- und Dauerniederschläge im Juli 2021, welche zu erheblichen Personen- und Sachschäden insbesondere in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen führten, aber auch Bayern betrafen. 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 2016 dargestellt:

- Braunsbach 29.05.2016 (Baden-Württemberg)
Am 29. Mai 2016 zerstörte Hochwasser sowie mitgeführtes Geröll, Gestein und Baumstämme den Ortskern von Braunsbach. Innerhalb einer Stunde fielen mehr als 90 mm Niederschlag im Einzugsgebiet des Orbacher Bachs [vgl. KLIWA 2016].
- Landkreis Birkenfeld 27.05.2018 (Rheinland-Pfalz)
Extreme Niederschläge hatten am 27. Mai 2018 im Landkreis Birkenfeld in Rheinland-Pfalz erhebliche Schäden angerichtet. Es war ein kleinräumiges aber sehr extremes Starkregenereignis. An der Messstation Bruchweiler im Hunsrück wurden 147 mm Niederschlag in etwas mehr als zwei Stunden registriert. Laut Radarmessung fielen nordöstlich davon sogar 170 mm Niederschlag. Die Wiederkehrzeit des Niederschlagsereignisses entspricht in den Bereichen mit den höchsten Niederschlagssummen deutlich mehr als 100 Jahre. Es fielen jedoch nicht nur punktuell extreme Niederschläge, auch das Gebietsmittel der Niederschlagssummen im Einzugsgebiet des Fischbachs war mit etwa 71 mm für dieses Ereignis extrem hoch.
- Starkregenereignisse im Jahr 2021 (Baden-Württemberg)
In 2021 führten wiederholt Starkregenereignisse zu schnell ansteigenden Hochwasserereignissen. Beispielsweise trat am Abend des 7. Juni insbesondere in der Region um Biberach an der Riß ein extremes Starkregenereignis auf. Auswertungen von Radarniederschlagsdaten zeigten, dass es sich um ein über 100-jährliches Ereignis mit Extremniederschlägen von bis zu 100 mm in wenigen Stunden handelte. Das Ereignis führte zu gravierenden Schäden innerhalb der betroffenen Gemeinden; Bäche traten über die Ufer und wurden zu reißenden Flüssen. An sieben Kennwertpegeln des Landes lagen die Hochwasserscheitel innerhalb kürzester Zeit im Bereich von 20- bis 50-jährlichen, teilweise 100-jährlichen Ereignissen und darüber. Ein ähnliches Bild zeigte sich am 23. / 24. Juni vor allem in den Oberläufen der Donauzuflüsse Kanzach, Riß, Rottum und Dürnach und im Zeitraum 28. - 30. Juni am oberen Neckar, den Zuflüssen des östlichen Neckars, der Enz und den Zuflüssen der oberen Donau.
- Teisendorf-Neukirchen/Landkreis Berchtesgadener Land 03.08.2021 (Bayern)
Im Zeitraum vom 01. bis 04. August 2020 löste Tiefdruckeinfluss über Mitteleuropa eine Dauerregenlage in Bayern aus. Dieser wurde teilweise durch Starkregen verstärkt und führte zu hohen bis sehr hohen Niederschlägen. Dies galt insbesondere am 03. August im südlichen Bayern. An diesem Tag bildete sich zudem am Rand eines Höhentroges das Bodentief Farideh über Norditalien aus, das bis zum 04. August weitere Niederschläge verursachte.



An der Messstation Teisendorf-Neukirchen im Landkreis Berchtesgadener Land wurde dabei ein Tagesniederschlag von 157 mm erfasst. Damit wurde ein über 100-jährliches Niederschlagsereignis nach KOSTRA-DWD-2010R [KOSTRA-DWD-2010R 2017] erreicht. In der Summe der viertägigen Dauerniederschläge ergibt sich für diese Messstation ein Wert von 241 mm. Aus diesen hohen Niederschlagssummen im Süden Bayerns entstanden im Isar- und Innbezugsgebiet sowie an der unteren Donau Hochwasser.

Stark- und Dauerniederschläge im Juli 2021

Der betrachtete Zeitraum des vorliegenden Monitoringberichtes reicht bis Oktober 2020, jedoch sollen aufgrund ihrer Aktualität die Stark- und Dauerniederschläge im Juli 2021 nicht unerwähnt bleiben.

Vom 12. bis 19. Juli 2021 zog das Tief „Bernd“ über West- und Mitteleuropa und sorgte für großflächige und anhaltende Stark- und Dauerniederschläge. In Deutschland besonders betroffen waren Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz. In beiden Bundesländern kam es zu weitreichenden Überschwemmungen, die zu einer hohen Zahl von Todesfällen und zu erheblichen Schäden an der Infrastruktur führten. Zusätzlich war in Bayern war das Berchtesgadener Land durch das abziehende Tief mit kurzzeitigen Starkniederschlägen betroffen.

Am 12. Juli brachte das Regengebiet zuerst in Baden-Württemberg bis über 50 l/m² in 24 Stunden und in Teilen von Hessen, Rheinland-Pfalz, dem Saarland und Nordrhein-Westfalen bis über 20 mm in 24 Stunden. Der Kern des Tiefdruckgebietes verlagerte sich aufgrund starker Hochdruckgebiete westlich und östlich von Deutschland nur sehr langsam und erreichte am 13. Juli die Mitte Deutschlands, wo es bereits zu ersten Starkregenereignissen kam. Ab dem 14. Juli lag der Kern des Tiefdruckgebietes über dem nordwestlichen Rheinland-Pfalz und dem südwestlichen Nordrhein-Westfalen. In diesem Gebiet fielen großräumig mehr als 100 mm Niederschlag in 72 Stunden, regional bis über 240 mm. Punktuell wurden in Deutschland in der Vergangenheit schon höhere Niederschlagsintensitäten aufgezeichnet, jedoch stellen diese Niederschläge in Summe **und** Ausdehnung über das gesamte Ereignis (inkl. außerdeutsche Gebiete) betrachtet einen neuen Rekord auf.

Aufgrund der langanhaltenden starken Niederschläge über einem großen Gebiet wurden ganze Flusseinzugsgebiete überregnet. In diesen sammelte sich das Wasser und wurde in den Bächen und Flüssen schnell kanalisiert. Begünstigt wurde dies durch die vorhandene Orographie und die überwiegend im Vorfeld gesättigten Böden.

Das Hauptniederschlagsgebiet im Einzugsgebiet der Ahr lag im nordrhein-westfälischen Oberen Einzugsgebiet. Bereits ab der Landesgrenze zu Rheinland-Pfalz traten an sämtlichen Gewässern enorme Überflutungen auf. Im weiteren Verlauf fanden schwerste Beschädigungen vor allem an der Oberen und insbesondere an der Mittleren Ahr statt. Die Städte Bad Neuenahr-Ahrweiler und Sinzig wurden mit großen Wassertiefen weiträumig überflutet. Bei dem extremen Hochwasser spielten die Brücken im Ahrtal eine entscheidende Rolle, denn dort staute sich das Wasser um bis zu 3 m auf. Unter diesem Aufstau versagte ein Großteil aller Brücken im Ahrtal, was jeweils mit einer zusätzlichen zerstörerischen Schwallwelle einherging. Die an der Ahr befindlichen Pegel Müsch, Altenahr und Bad Bodendorf wurden mit steigendem Wasserstand zerstört oder die Datenübertragung fiel aus. Aus diesem Grund sind die maximalen Wasserstände nur indirekt durch Einmessungen und Nachrechnungen näherungsweise bestimmbar. Am Pegel Altenahr wurde ein maximaler Wasserstand von 10,19 m eingemessen, der jedoch stark durch Rückstaueffekte beeinflusst war. Auch in der Westeifel traten an vielen Gewässern großräumig Überschwemmungen durch extremes Hochwasser auf. Es waren 134 Todesopfer im Landkreis Ahrweiler und ein Todesopfer in der Westeifel zu beklagen. Mit Abdehen des Tiefs „Bernd“ traten auch in Baden-Württemberg und Bayern große Starkniederschläge auf. Dies führte lokal zu Sturzfluten und Erdrutschen.

Die Wahrscheinlichkeit für solch extreme Regenfälle hat sich durch den von Menschen verursachten Klimawandel laut einer ersten Studie um das **1,2- bis 9-Fache** erhöht; die maximale Niederschlagsmenge hat sich zwischen **3 und 19 Prozent** erhöht [KREIENKAMP ET AL. 2021].



Trockenheit

Neben Starkregenereignissen war der Zeitraum ab 2016 durch sehr trockene Perioden mit wenig Niederschlag geprägt. Besonders das Jahr 2018 sticht hier als Extremjahr heraus. Abgesehen von den überdurchschnittlich feuchten Monaten Januar und Dezember war das Jahr zu trocken. In Süddeutschland fiel im Durchschnitt 21 % weniger Niederschlag im Vergleich zum Zeitraum 1971–2000 (Baden-Württemberg minus 21 %, Bayern minus 20 %, Hessen minus 26 % und in Rheinland-Pfalz minus 18 %). Auch der Trockenheitsindex stieg in Folge deutlich an. Im langjährigen Mittel 1971–2000 beträgt der Trockenheitsindex 53 Tage. Für das Jahr 2018 liegt der Index bei 129 Tagen. Eine detaillierte Zusammenfassung mit klimatischer Einordnung des Jahres 2018 findet sich in einem KLIWA-Kurzbericht [KLIWA 2019b].

1.3 Hochwasser

Trendaussagen zu dem Langzeitverhalten von Hochwasserabflüssen finden sich in Kapitel 6. Im Folgenden werden extreme Hochwasserereignisse der Periode 2016–2020 betrachtet. Neben einer Vielzahl an kleinräumigen Hochwasserereignissen ist das Hochwasserereignis im Januar 2018 besonders markant.

Anfang Januar 2018 haben sich in **Baden-Württemberg** aufgrund ergiebiger Niederschläge und dem Abschmelzen der in höheren Lagen anfangs noch vorhandenen Schneedecke zunächst in kleineren und mittleren Gewässern des Schwarzwalds zahlreiche kleinere und mittlere Hochwasser (2-jährlich bis kleiner 20-jährlich) und vereinzelt über 20-jährliche Ereignisse entwickelt. Im weiteren Verlauf verlagerten sich die Hochwasserabflüsse in die größeren Gewässer und führten zu 2- bis 5-jährlichen Ereignissen an den Pegeln von Neckar, Rhein, Donau und Main. Ende Januar 2018 bildete sich eine erneute Hochwasserlage aus und führte im Schwarzwald, der Schwäbischen Alb sowie in Oberschwaben verbreitet zu 2- bis 10-jährlichen, vereinzelt auch über 10-jährlichen, Ereignissen. Im Oberrhein bei Maxau trat ein etwa 10-jährliches sowie an der baden-württembergischen Donau ein 2 bis 5-jährliches Hochwasser auf. Daneben kam es über einen Zeitraum von vier Wochen im Mai/Juni 2016 gehäuft zu teils extremen Niederschlägen in deren Folge partiell Scheitelabflüsse im Bereich von Extremhochwasser auftraten (z. B. Laupheim/Rottum, Goppertshofen/Rottum). An den Pegeln Stein/Kocher und Schwäbisch Gmünd/Rems wurden die Höchststände seit Beginn der Messungen erreicht. Im Kocher-Jagst-Gebiet stiegen die Wasserstände außerordentlich rasch an, z. B. am Pegel Elpershofen/Jagst innerhalb von 2 Stunden um 2,6 m. Es ist davon auszugehen, dass in den direkt von Gewitterzellen betroffenen kleineren Bächen, in denen sich Sturzfluten ausbildeten, lokal extreme Hochwasserjährlichkeiten aufgetreten sind (z. B. Orlacher Bach in der Gemeinde Braunsbach). Darüber hinaus bildeten sich lokale Überflutungen auch unabhängig vom Gewässernetz durch „wildes Abfluss“. Im gleichen Zeitraum wurde aufgrund ergiebiger Niederschläge in Verbindung mit einer hohen Vorfeuchte der Böden im Einzugsgebiet der Hochwassermeldestufe am Bodenseepegel Konstanz überschritten und erreichte einen Wasserstand von 5,13 m (10-jährliches Seehochwasser). Das große Bodenseehochwasser mit 565 cm vom Mai/Juni 1999 blieb damit weit unterschritten.

In **Bayern** verursachten im August 2020 hohe Niederschlagsmengen ein markantes Hochwasserereignis. Eine Mischung aus Dauerregen mit auch flächenmäßig außergewöhnlich hohen Regenmengen und Starkregen führte im Zeitraum vom 03. bis 08. August 2020 zu Überschwemmungen der Isar und des Inns sowie deren Einzugsgebiete: An insgesamt fünf Pegeln an der Glonn im Mangfallgebiet, an den Salzach-Zuflüssen Kleiner Sur und Stoißer Ache sowie dem Chiemsee-Zufluss Überseer Bach hatten die Hochwasserscheitel einen Abflusswert mit einer Jährlichkeit von über 100 Jahren. Der Pegel Feldolling/Mangfall zeigte ein Hochwasser der höchsten Meldestufe 4 des bayerischen Hochwassernachrichtendienstes (entspricht einer Jährlichkeit von ≥ 50). Überschwemmungen der Meldestufe 3 (entspricht einer Jährlichkeit von ≥ 20)

traten zusätzlich nicht nur an den kleineren Zuflüssen auf, sondern auch an den großen Flüssen wie der unteren Isar, dem Inn und an der Donau in Passau. Zudem wurden an fast 50 Pegeln Überflutungen im Bereich der Meldestufe 1 (entspricht einer Hochwasserjährlichkeit von ≥ 2) erreicht.

In **Rheinland-Pfalz** war sowohl der Ober- als auch der Mittelrhein vom Hochwasser im Januar 2018 betroffen. Das Hochwasser kann in zwei Phasen eingeteilt werden. Der maximale Wasserstand der ersten Phase am Pegel Maxau von 8,45 m wurde am frühen Morgen des 6. Januars erreicht. Die Zuflüsse Neckar und Main entsprachen einem fünf- bzw. zweijährlichen Ereignis. Dies führte dazu, dass am Pegel Mainz ebenfalls ein 5-jährliches Hochwasserereignis aufgezeichnet wurde. Am Mittelrhein überlagerten sich die Wellen von Rhein und Mosel, sodass am Pegel Koblenz bereits am 2. Januar die Meldehöhe erreicht wurde und bis auf 7,53 m am frühen Morgen des 8. Januars anstieg. Dies liegt deutlich über der Meldemarke 3, die bei 7,00 m liegt. Die zweite Welle war ab Mainz deutlich unter der ersten Welle. In Worms hingegen übertraf der Scheitel der zweiten Welle die erste Welle um 13 cm.

1.4 Niedrigwasser

Ein Niedrigwasserereignis äußert sich in geringen Abflüssen, See- oder Grundwasserständen, als Folge von Trockenheit. Dabei 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 2016–2020 betrachtet, wobei insbesondere das Niedrigwasserjahr 2018 hervorsteicht:

Niedrigwasser 2018

Die trockene Witterung führt ab Mitte Juli 2018 zu einer großräumigen Niedrigwassersituation. Bis August stieg der Anteil der KLIWA Pegel mit Niedrigwasser auf über 50 % und schwankte dann zwischen 30 % und über 60 % bis Mitte November. Erst Anfang Dezember entspannte sich die Niedrigwassersituation.

Das Besondere an dieser Niedrigwassersituation war seine großräumige Ausdehnung in Verbindung mit seiner langen Andauer von Juli/August bis Dezember und damit weit über die Vegetationsperiode hinaus. Im Referenzzeitraum 1971-2000 gab es kein Ereignis, dass über einen so langen Zeitraum mindestens 30 % der KLIWA-Pegel betraf und im Spätherbst noch einmal ein Maximum erreichte. Eine detaillierte Zusammenfassung mit klimatischer Einordnung des Jahres 2018 findet sich in einem KLIWA-Kurzbericht [KLIWA 2019b].

Auch in **Baden-Württemberg** war 2018 sowohl in seiner zeitlichen als auch in seiner räumlichen Ausdehnung ein außerordentliches Niedrigwasserjahr und vergleichbar mit den Niedrigwasserjahren 2003 und 2015. Bis zu 80 % aller Kennwertpegel des Landes waren zeitgleich von Niedrigwasser betroffen. Der Rheinpegel Maxau führte an 27 % der Tage des Jahres 2018 Niedrigwasser und erreichte den niedrigsten Wasserstand seit dem Jahr 1972. Gemeindegebrauch und Schifffahrt mussten eingeschränkt werden. Es entstand ein hoher wirtschaftlicher Schaden.

In Bayern waren die Jahre 2018 und 2019 äußerst warme und trockene. Dies führte zu Niedrigwasserphasen in großen Teilen Bayerns. Zwischen dem Allgäu und Niederbayern sowie in den östlichen Mittelgebirgslagen wiesen 2018 zahlreiche Gewässer die niedrigsten Abflussmengen seit Beobachtungsbeginn auf. Dabei wurden oftmals neue Niedrigstwerte gemessen, die selbst die Niedrigstwerte der Trockenjahre 1976 und 2003 unterschritten. Zudem fielen vor allem in Ober- und Unterfranken viele kleine Fließgewässer trocken. 2019 führten die enormen Schneemengen der Wintermonate zu einer günstigeren Abflusssituation in den alpin-beeinflussten



Fließgewässern. Jedoch wiesen Teile der Oberpfalz sowie Frankens erneut Niedrigwassersituation mit neuen Niedrigstwerten auf – Werte von 1976, 2003 sowie 2018 wurden oftmals erneut unterschritten [vgl. BLfU 2020].

1.5 Boden- und Grundwasserhaushalt

Die insgesamt hohen Temperaturen und vergleichsweise niedrigen Niederschlagsmengen seit 2003 haben besonders in den vergangenen Jahren erhebliche Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt und das Grundwasser gezeigt. So waren die jüngsten Jahre geprägt von einer erhöhten und häufigeren Trockenheit im Boden, was negative Auswirkungen sowohl für die natürliche Wasserversorgung der Pflanzen, als auch auf die Grundwasserneubildung aus Niederschlag und somit die Regeneration der Grundwasserressourcen hatte (Abb. 1).

Die jährlichen Grundwasserneubildungsraten in Süddeutschland waren in sechs der sieben vergangenen Jahre weit unterdurchschnittlich, lediglich das Jahr 2016 lag nur vergleichsweise knapp unter dem vieljährigen Mittelwert. Gleichzeitig stiegen durch die anhaltende Trockenheit, besonders während der Sommermonate, der Wasserverbrauch und somit die Entnahmemengen aus dem Grundwasser. Es resultierte ein erhebliches Ungleichgewicht zwischen der Regeneration und dem Verbrauch von Grundwasser, der regional teilweise sogar zu Engpässen in der Trinkwasserversorgung führte.

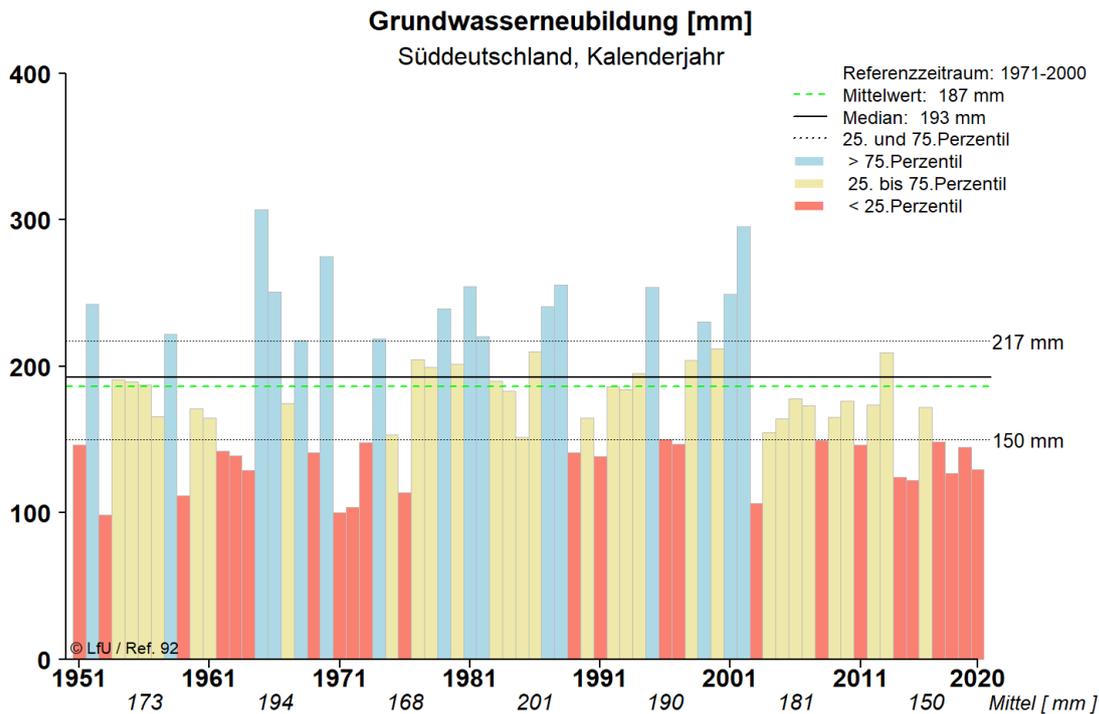


Abb. 1: Entwicklung der jährlichen Grundwasserneubildung aus Niederschlag im erweiterten KLIWA-Gebiet.

Niedrigstwerte

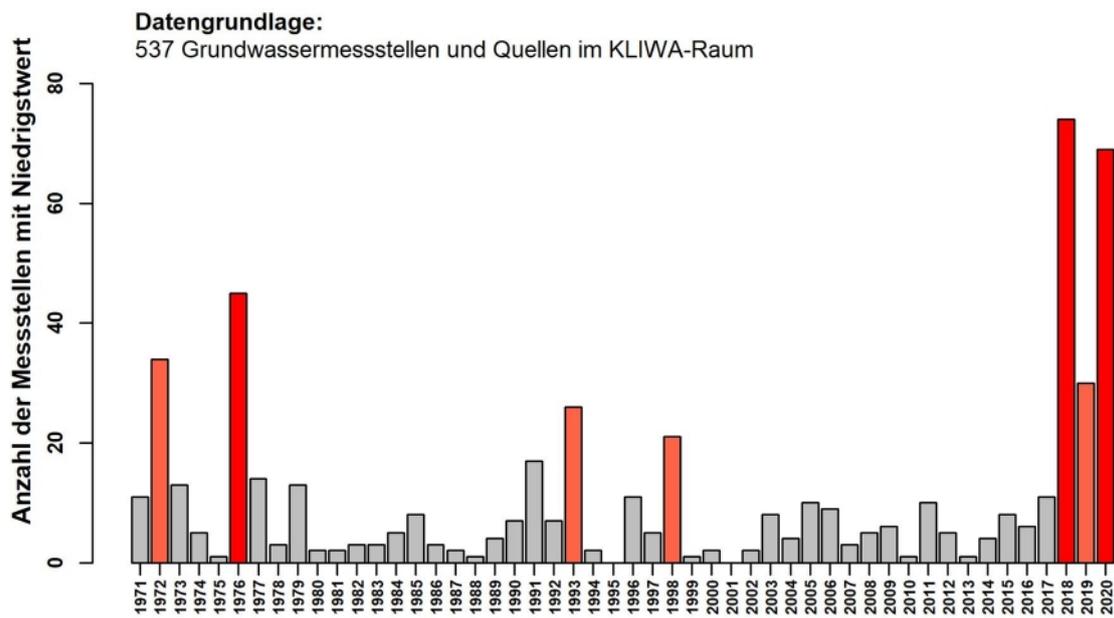


Abb. 2: Niedrigstwerte im Grundwasser an 537 Grundwassermessstellen und Quellen im erweiterten KLIWA-Gebiet.



2 Klimamonitoring im Rahmen der KLIWA-Kooperation

Der Klimawandel ist kein Phänomen der Zukunft, sondern wir leben bereits seit Jahrzehnten mit ihm. Seine Auswirkungen sind in Süddeutschland deutlich spürbar. Durch langfristige Änderungen der meteorologischen Kenngrößen ist auch der Wasserhaushalt und die Gewässerökologie 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, www.kliwa.de) für eine langfristige gebiets- und fachübergreifende Zusammenarbeit vereinbart. Seit 2007 ist an dieser Kooperation auch das Land Rheinland-Pfalz beteiligt. In diesem Monitoringbericht kommen für Kenngrößen aus dem Bereich Meteorologie außerdem die Länder Hessen und Saarland hinzu.

Ein elementarer Projektbereich in KLIWA ist die (retrospektive) Ermittlung des Langzeitverhaltens und die Erfassung gegenwärtiger Veränderungen hydro(meteoro)logischer Messzeitreihen (vgl. Abb. 3), um sich 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-Hefte“ veröffentlicht. Der erste KLIWA Monitoringbericht [KLIWA 2008b] erschien im Jahr 2008 auf Grundlage von Messreihen bis 2005. Dieser wurde im Jahr 2011 mit einer Verlängerung der Messreihe bis 2010 fortgeschrieben [KLIWA 2011b], erstmals mit dem KLIWA-Partner Rheinland-Pfalz und den Themenbereichen Grundwasser und Bodensee. Der dritte Monitoringbericht mit Verlängerung der Messreihe bis 2015 wurde 2016 veröffentlicht [KLIWA 2016], erstmalig ergänzt durch die Auswertung der mittleren Abflüsse. Nun liegen die Ergebnisse der weiteren Verlängerung der Messreihen bis 2020 vor und sind im Sinne eines Klimamonitorings dargestellt. In diesem Bericht sind erstmalig auch meteorologische Auswertungen für die Gastbundesländer Hessen und Saarland enthalten. Zudem wurde das gewässerökologische Klimafolgen-Monitoring gestartet, das hier vertieft vorgestellt werden soll.

Das Monitoring zum Klimawandel in Süddeutschland basiert in KLIWA auf einem integrierten Messnetz des DWD und der Länder und ist ein eigener KLIWA Projektbereich (Abb. 3). Damit ist ein langfristig angelegtes, einheitliches Vorgehen gewährleistet, durch das die relevanten meteorologischen, hydrologischen und gewässerökologischen Kenngrößen in ihrer zeitlichen Entwicklung erfasst und in regelmäßigen Abständen zeitnah ausgewertet werden können. 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 in Deutschland und Europa publiziert der DWD in seinem jährlichen Klimastatusbericht und auch regelmäßig im Nationalen Klimareport.

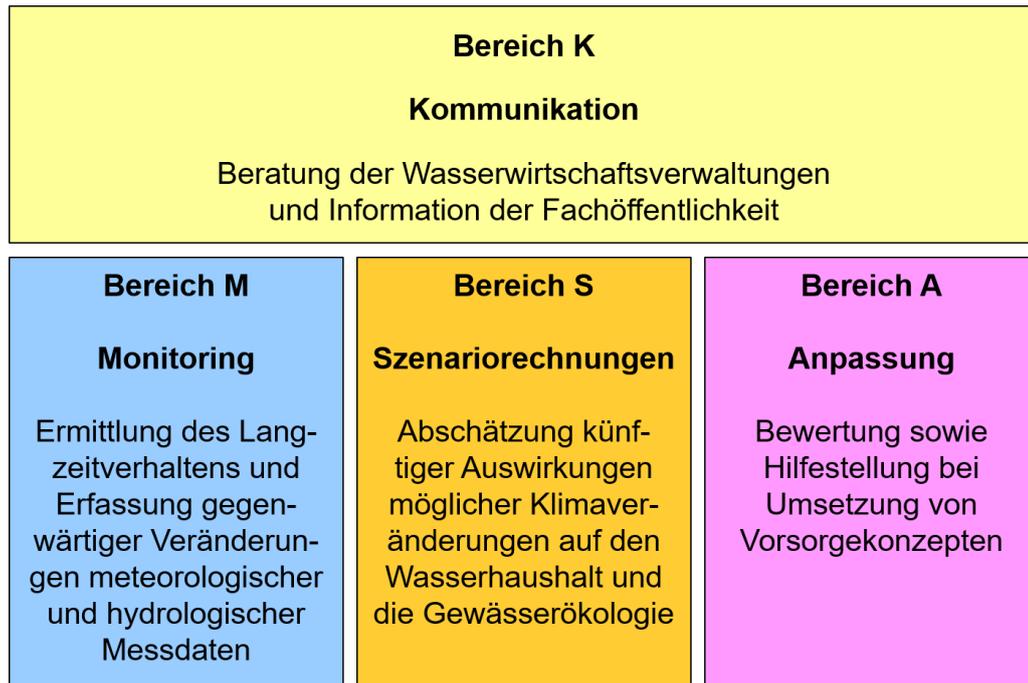


Abb. 3: Struktur der KLIWA-Projektbereiche ab 2022.



3 Methodisches Vorgehen

Grundlage des Monitorings 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 in KLIWA umfangreiche Untersuchungsergebnisse zum Langzeitverhalten für die nachstehenden, den Wasserhaushalt und die Gewässerökologie beeinflussenden, Kenngrößen vor:

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

Für die Hydrologie: Mittlere Abflüsse – Hochwasserabflüsse – Niedrigwasserabflüsse – Grundwasserstände/Quellschüttungen

Für die Gewässerökologie: Chemische/physikalische Langzeitdaten des Bodensees

Die Untersuchungsergebnisse sind ausführlich in einer Reihe von KLIWA-Heften [KLIWA 2002; KLIWA 2003; KLIWA 2005a; KLIWA 2005b; KLIWA 2005c; KLIWA 2006; KLIWA 2007; KLIWA 2008a; KLIWA 2011a] veröffentlicht und bilden für die Kenngrößen Gebietsniederschlag, Starkniederschlag, Lufttemperatur, Mittlere Abflüsse, Hochwasserabflüsse, Niedrigwasserabflüsse, Grundwasserstände/Quellschüttungen sowie chemische/physikalische Langzeitdaten des Bodensees die Basis der Monitoringberichte. Der erste Monitoringbericht [KLIWA 2008b], für den Zeitraum 1931 bis 2005, wurde im Jahr 2011 für den Zeitraum 1931 bis 2010 sowie im Jahr 2016 für den Zeitraum 1931 bis 2015 fortgeschrieben [KLIWA 2011b; KLIWA 2016]. Im Rahmen des vorliegenden vierten Monitoringberichts [KLIWA 2021], sind die Ergebnisse der fortgeschriebenen Zeitreihenbewertung der Kenngrößen bis 2020 dargestellt. Gegenüber dem dritten Monitoringbericht wird zudem das gewässerökologische Klimafolgen-Monitoring vorgestellt.

Für eine Kurzdarstellung waren folgende Aspekte wesentlich:

Da sich dieser Bericht als Fortführung des Klimamonitorings versteht, wurde auf eine konsistente Auswertung und Darstellung gegenüber den ersten Monitoringberichten 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 KLIWA-Regionen oder KLIWA-Untersuchungsgebiete gewählt, die nach den verschiedenen Flussgebieten Süddeutschlands festgelegt wurden und Grundlage verschiedener bisheriger Datenanalysen waren. Mit der aktuellen Fortschreibung sind zu den Auswertungen in Teilen die assoziierten Bundesländer Hessen und Saarland hinzugekommen, sodass nun 15 KLIWA-Regionen und 53 KLIWA-Untersuchungsgebiete unterschieden werden (siehe Abb. 4 und Abb. 5).

Es ist dabei zu beachten, dass sich in manchen Regionen und Untersuchungsgebieten die räumliche Ausdehnung aufgrund der Hinzunahme der beiden Länder verändert haben (siehe Abb. 5). Die größten Veränderungen ergeben sich dabei im Mosel-Sieg-Gebiet. Außerdem gab es eine Veränderung in der Aufteilung der Bodenseeregion, um das Rhein- und Donaueinzugsgebiet zu trennen. Alle Auswertungen, auch die Aussagen zu den früheren Zeiträumen, beziehen sich auf die aktuell genutzte Gebietsaufteilung. Die hydrologischen Kenngrößen werden für das gesamte KLIWA-Gebiet zusammengefasst.

| Untersuchungsgebiete: | |
|--|---|
| Donau | Lahn |
| D1 Quelle bis Lauchert | L1 Quelle bis zur Dillmündung |
| D2 Donau, uh. Lauchert bis oh. Iller | L2 Lahn mit Dill bis zur Landesgrenze HE-RP |
| D3 Iller | L3 Lahn, Landesgrenze HE-RP bis zur Mündung |
| D4 Donau, uh. Iller bis oh. Wörnitz u. Lech | Mosel |
| D5 Lech | Mo1 Mosel rechtsseitig von der Grenze |
| D6 Wörnitz, Altmühl u. Schw. Laber | Mo2 Mosel linksseitig von der Grenze bis Kyll |
| D7 Donau, uh. Lech bis oh. Naab | Mo3 Mosel von der Dhron bis zum Alfbach |
| D8 Naab | Mo4 Mosel bis zur Mündung |
| D9 Regen | Neckar |
| D10 Donau, uh. Naab bis oh. Isar | N1 Quelle bis oh. Fils |
| D11 Isar | N2 Neckar u. Fils bis oh. Kocher (ohne Enz) |
| D12 Vils und Rott | N3 Enz |
| D13 Alz und Salzach | N4 Kocher |
| D14 Inn | N5 Jagst |
| D15 Donau, uh. Isar bis Grenze | N6 Neckar, uh. Jagst bis Mündung |
| Eder-Diemel | Rhein |
| W3 Eder | R1 Bodensee |
| W4 Diemel | R2 Rhein, uh. Bodensee bis Wiese |
| Elbe | R3 Rhein, uh. Wiese bis oh. Kinzig |
| E1 Sächs. Saale u. Eger | R4 Rhein und Kinzig bis Murg |
| Fulda-Werra | R5 Rhein, uh. Murg bis oh. Neckar |
| W1 Werra | R6 Rhein u. Schwarzbach |
| W2 Fulda mit Oberweser | R7 Rhein, Isenach bis Nahe (ohne Selz) |
| Main | R8 Selz |
| M1 Main bis oh. Regnitz | R9 Rhein und Nahe bis zur Lahn |
| M2 Regnitz | R10 Rhein rechtsseitig von Neckar bis Main |
| M3 Main, uh. Regnitz bis oh. Fränk. Saale | R11 Ahr, Wied u. Nette |
| M4 Fränkische Saale | R12 Sieg |
| M5 Tauber | Saar |
| M6 Main, uh. Fränk. Saale bis zur Landesgrenze BY-HE | S1 Saar, Grenze bis zur Landesgrenze SL-RP |
| M7 Hessisches Maingebiet u. Rheingau | |

Abb. 4: Aufzählung und genaue Beschreibung der 53 KLIWA-Untersuchungsgebiete und der 15 KLIWA-Regionen.

Die ausgewählten Kenngrößen stehen als Jahresserien zur Verfügung. Alle berücksichtigten meteorologischen Datenserien haben eine Zeitreihenlänge von 1931 bis 2020; für die hydrologischen Winterhalbjahre wurde deshalb die Periode 1932 bis 2020, für die hydrologischen Sommerhalbjahre die Periode 1931 bis 2020 ausgewertet. Der Unterschied um ein Jahr wird im Folgenden nicht weiter berücksichtigt und es wird in der Regel die Bezeichnung von 1931 bis 2020 verwendet. Die betrachteten Zeiträume für die hydrologischen Kenngrößen und deren Verfügbarkeit sind in den jeweiligen Kapiteln beschrieben.

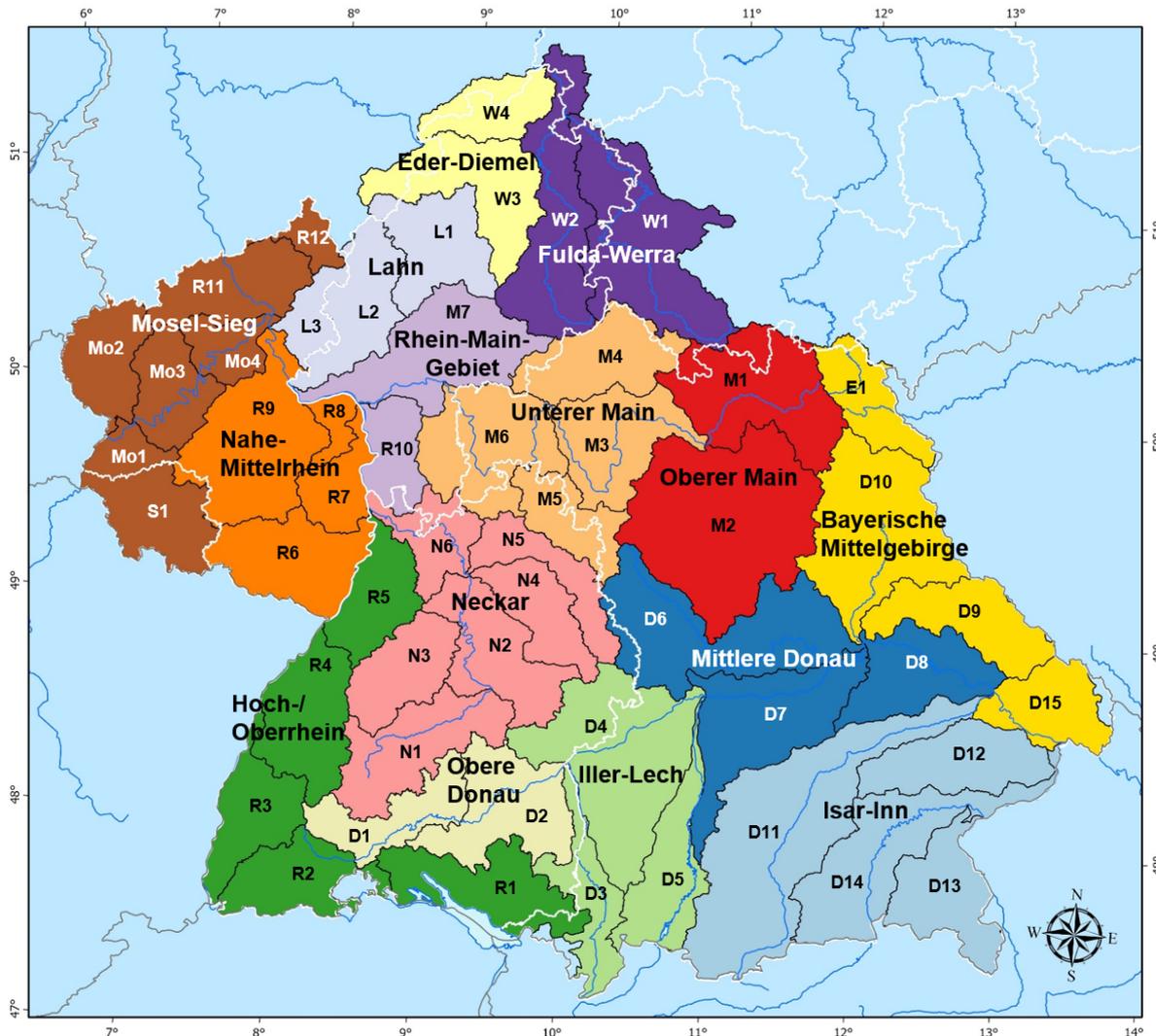


Abb. 5: Übersicht über die 53 KLIWA-Untersuchungsgebiete und die 15 KLIWA-Regionen.

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. Dabei ist zu beachten, dass der ermittelte lineare Trend stark durch die hydrometeorologische Ausprägung des gewählten Anfangs- bzw. Endzeitraums der Analyse beeinflusst wird. 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 kurzfristige Schwankungen der Zeitreihe zu unterdrücken. Dabei ist zu beachten, dass der Filter für das gleitende Mittel am Anfang und Ende der Zeitreihe vorzeitig 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 2020 wird im Vergleich zu den Zeiträumen bis 2000, 2005, 2010 und 2015 betrachtet.

4 Lufttemperatur

4.1 Bisherige Auswertungen

Im Heft 5 der KLIWA-Berichte [KLIWA 2005a] sowie dem ersten Monitoringbericht [KLIWA 2008b] wurde das Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern anhand von Gebietsmittelwerten für die im KLIWA-Projekt abgestimmten 33 Untersuchungsgebiete bzw. 9 Regionen für die Zeitreihe 1931 bis 2005 untersucht. Ausgewertet wurde das Trendverhalten der Jahresmittel- und der Monatsmitteltemperaturen, wodurch markante innerjährliche Unterschiede der Lufttemperaturänderungen aufgezeigt werden konnten. Seitdem wurden in fünfjährlichem Abstand durch sogenannte Monitoringberichte die Zeitreihen und Analysen fortgeschrieben. Mehr Details zum methodischen Vorgehen und dem aktuellen KLIWA-Gebiet mit 15 Regionen und 53 Untersuchungsgebieten siehe Kapitel 3.

Die Zeitreihe 1931 bis 2015 war im süddeutschen Untersuchungsraum durch einen starken Anstieg der Lufttemperaturen seit Ende der achtziger Jahre des letzten Jahrhunderts gekennzeichnet. Die signifikante Zunahme der Jahresmitteltemperaturen resultierte aus einer flächendeckend zu verzeichnenden Zunahme der Lufttemperaturen in allen Monaten mit Ausnahme des Septembers. Dabei zeigten sich im Dezember in den meisten Regionen weiterhin die stärksten und signifikantesten Trends im Jahresablauf. Allein im September waren so gut wie keine Veränderungen über den ganzen Zeitraum festzustellen. Schwerpunkt der Temperaturzunahme bis 2015 gegenüber 1931 bis 2000 war das Sommerhalbjahr, dessen Erwärmung gegenüber dem Winterhalbjahr aufgeholt hatte. Im Langzeitverhalten seit 1931 war jedoch weiterhin die Temperaturzunahme im Winterhalbjahr größer als die im Sommerhalbjahr, obwohl die Erwärmung in den letzten 15 Jahren im Sommerhalbjahr stärker als im Winterhalbjahr ausgefallen war.

In diesem Monitoringbericht werden für Bayern, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz, Hessen und Saarland die Temperatur-Zeitreihen 1931 bis 2020 ausgewertet. Um direkte Aussagen über eine Veränderung der Trends machen zu können, werden Trendvergleiche zwischen den zwei 70-jährigen Zeiträumen 1931 bis 2000 und 1951 bis 2020 vorgenommen.

4.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung

Durch Verlängerung der Untersuchungsperiode bis einschließlich 2020 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 2021].

Als Datengrundlage der Langzeituntersuchung dienen die Stationszeitreihen der täglichen Lufttemperatur von bis zu 260 über das KLIWA-Gebiet 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. 190), um 1991 jedoch mit 270 Stationen leicht höher. Vor der Berechnung von Gebietsmittelwerten werden die Messdaten regionalisiert [zur Methodik vgl. MÜLLER-WESTERMEIER 1995; MAIER, MÜLLER-WESTERMEIER 2010]. Aufgrund des hohen Aufwandes des Anfangs in KLIWA verwendeten Verfahrens zur Regionalisierung der Lufttemperatur aus Tagesdaten [KLIWA 2005a; KLIWA 2008b] wird seit dem zweiten Monitoringbericht 2011 [KLIWA 2011b] 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 Aussagen 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 2020 und des Trendvergleiches der 70- bzw. 90-jährigen Zeitreihen erfolgt daher nachstehend nur für größere Flächeneinheiten, also die der 15 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. 6 sind die Mitteltemperaturen der letzten 5 Jahre (2016 bis 2020) und der Vergleich mit dem langjährigen Mittel 1961 bis 1990 (Referenzperiode der WMO für Klimabetrachtungen) dargestellt. Es zeigt sich im Vergleich zu den Auswertungen beim letzten Monitoring-Bericht [KLIWA 2016], dass es eine deutliche Zunahme von 0,3 °C und mehr zu den fünf Jahren davor (2011 bis 2015) gibt. Die Mitteltemperaturen liegen damit zwischen 8,7 und 10,9 °C und die Abweichungen zwischen 1,7 und 2,0 °C. Die Zunahme der Lufttemperatur spiegelt sich auch deutlich in Abb. 7 wieder.

In Abb. 7 sind beispielhaft die Zeitreihenverläufe der Jahresmitteltemperaturen für die Regionen Mosel-Sieg, Neckar und Isar-Inn dargestellt. Der Verlauf ist für alle 15 KLIWA-Regionen grundsätzlich ähnlich. Es zeigt sich über den 90-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 Gesamt-raumes ein ähnlicher Verlauf der Gebietsmitteltemperaturen.

Seit Ende der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts hält die Periode der vorwiegend überdurchschnittlichen Jahresmitteltemperaturen weiterhin an. Dabei ist in den letzten 20 Jahren nur das Jahr 2010 deutlich kühler, wobei die absoluten Minima in den Zeitreihen vor 1960 nie erreicht werden. 2018 wurden die absoluten Jahreshöchsttemperaturen in allen Regionen gemessen, dabei lagen die Temperaturen im Schnitt mehr als 2 °C über dem langjährigen Mittel 1961 bis 1990. Insgesamt lagen seit 2001 19 von 20 Jahre in allen 15 Regionen über dem langjährigen Mittel 1961 bis 1990. Außerdem waren 2014 und 2018 bis 2020 mit Abstand die insgesamt wärmsten Jahre.

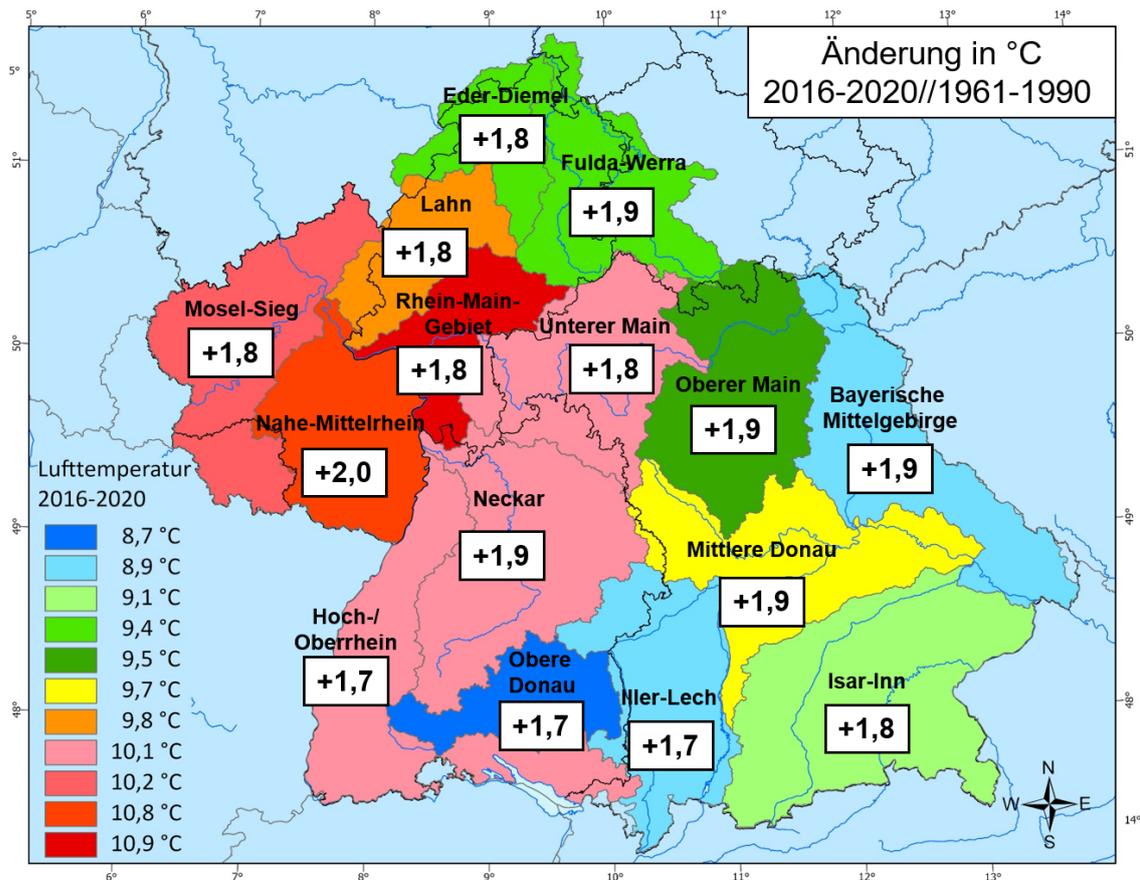


Abb. 6: Mittlere Lufttemperatur in °C im Zeitraum 2016-2020 (farbig) und die Abweichung vom Mittelwert 1961–1990 (Zahlen) für die KLIWA-Regionen.

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 (siehe auch Ringdiagramme in Abb. 7). 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 sind diese Werte aber eindeutig durch den Winter 2007/2008 und 2019/2020 übertroffen worden. 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 bis 1990, was wohl daran liegt, dass zwar einzelne Monate im Winter wesentlich kälter als in den Jahren davor waren aber nicht das gesamte Halbjahr, da es im Frühjahr und Herbst auch sehr milde Monate gab. Inzwischen ist 2018 das wärmste Sommerhalbjahr in der betrachteten Zeitreihe und hat deutlich die Sommer 1947, 2003 und 2006 abgelöst. Die letzten fünf Sommerhalbjahre gehören zu den wärmsten der gesamten Zeitreihe inklusive dem absoluten Spitzenreiter 2018 für alle Regionen. Insgesamt ist aber ein deutlicher Anstieg der Lufttemperatur im Sommerhalbjahr seit den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts zu verzeichnen, wobei bis auf 1996 und 2010 der langjährige Mittelwert 1961 bis 1990 teilweise deutlich übertroffen wird. Gehäuft auftretende Sommer mit zu kühlen Werten, wie zwischen den 50er und 80er Jahren des vorherigen Jahrhunderts, sind in der neueren Zeit nicht wieder aufgetreten.

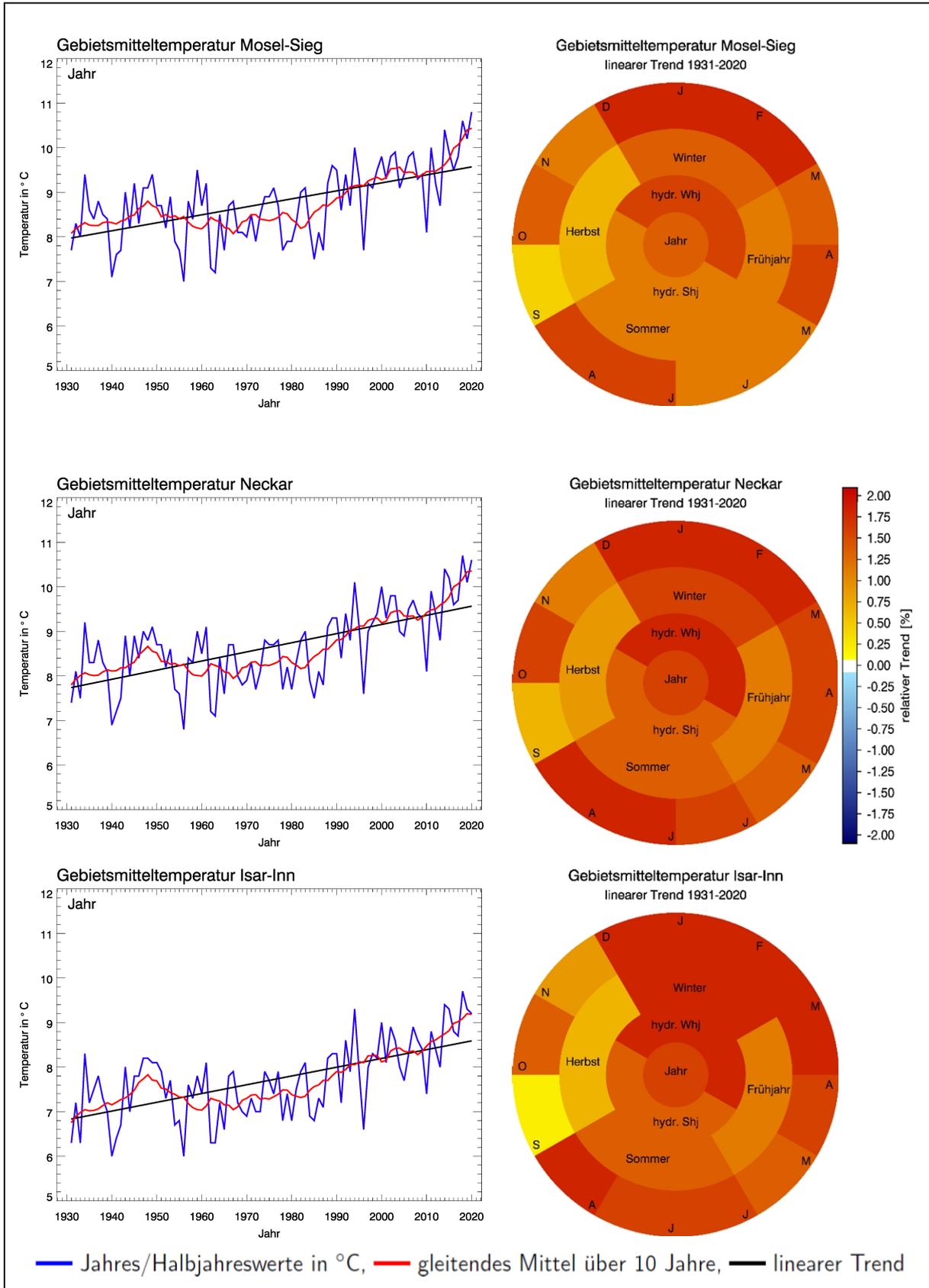


Abb. 7: Gebietsmitteltemperaturen in den Regionen Mosel-Sieg, Neckar und Isar-Inn; Zeitraum 1931–2020: Zeitreihen und Trends für die Jahresmitteltemperaturen sowie Ringdiagramme mit Trendangaben.

Trends der Gebietsmittelwerte

Für die 15 KLIWA-Regionen zeigt der lineare Trend der Jahresmitteltemperaturen eine signifikante Zunahme von 1,4 bis 1,8 °C/90 Jahre (siehe auch Beispielreihen in Abb. 7). Da für hydrologische Betrachtungen der Jahresverlauf wichtig ist, werden im Folgenden die hydrologischen Halbjahre genauer beschrieben:

Die **Winterhalbjahrestemperaturen** der Zeitreihe 1931 bis 2020 weisen in allen Regionen des Untersuchungsraumes einen hoch signifikanten positiven Trend auf (siehe Abb. 8). Das Winterhalbjahr weist mit Zunahmen zwischen +1,6 und +2,1 °C/90 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. 7 zeigen die Verteilung der Veränderungen innerhalb der Monate und Quartale. Die Wintermonate Dezember und Januar weisen die stärksten positiven Trends auf, während der Monate November 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.

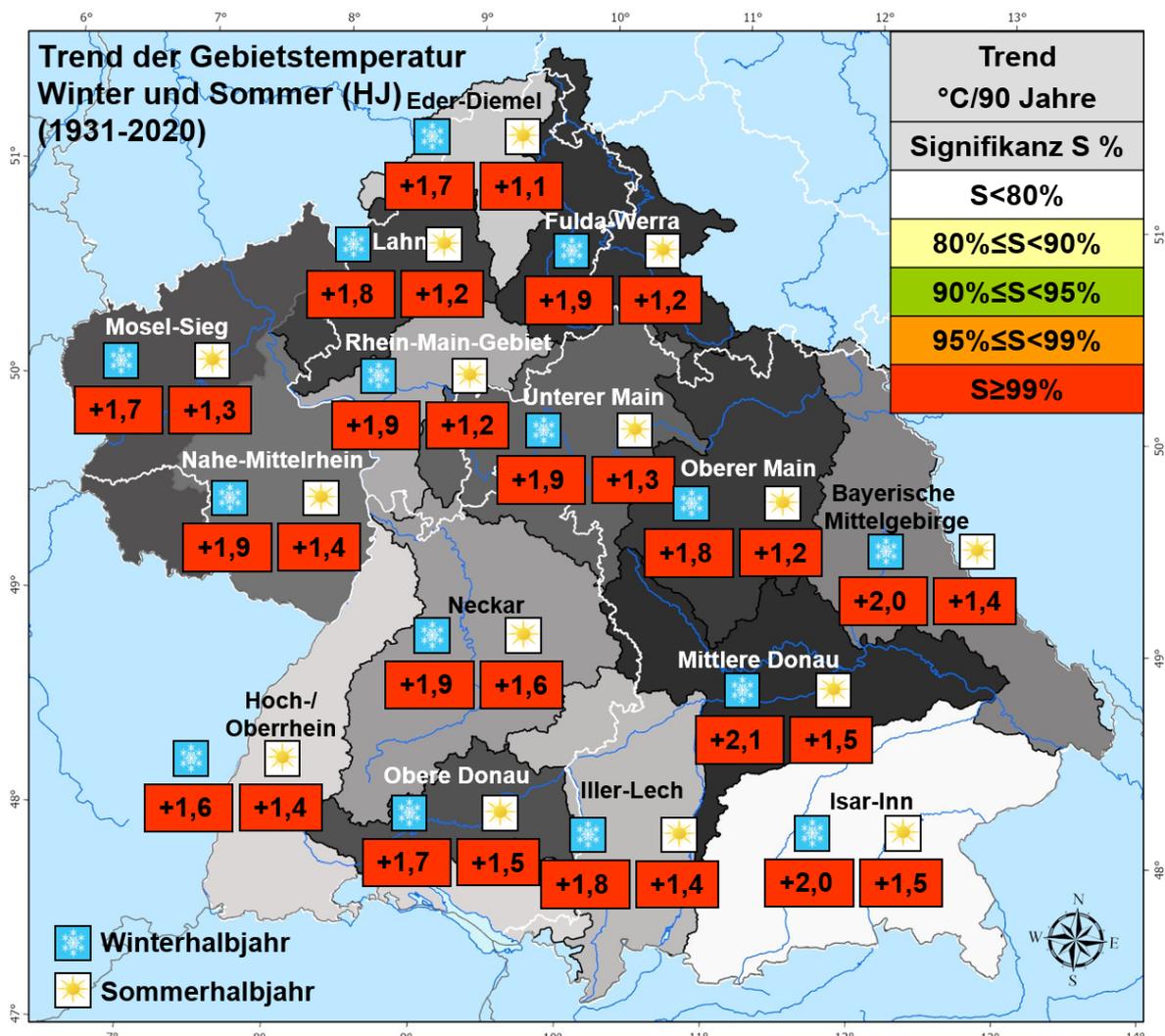


Abb. 8: Entwicklung der mittleren Lufttemperatur in den hydrologischen Halbjahren, Trend in °C/90 Jahre im Zeitraum 1931–2020.



Die **Sommerhalbjahrestemperaturen** der Zeitreihe 1931 bis 2020 weisen ähnlich dem Winterhalbjahr in allen Regionen einen positiven Trend auf, der allerdings insgesamt nicht so stark ausgeprägt ist wie im Winterhalbjahr (vgl. Abb. 8). Die Gebietstrends sind jedoch ebenfalls alle hoch signifikant und liegen zwischen $+1,1$ und $+1,6$ °C/90 Jahre.

Die Ringdiagramme für drei beispielhafte Regionen in Abb. 7 zeigen, dass der Monat September in allen Regionen nur sehr schwach positive Gesamttrends aufweist und in Folge die Trends für den Herbst und das Sommerhalbjahr deutlich 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 Tab. 1 sind die Trendwerte der Zeitreihe 1951 bis 2020 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 1951 für die Trendberechnung. Weitere Untersuchungen zeigen jedoch, dass davon die grundlegenden Aussagen (Veränderungen in Trendrichtung und Signifikanz) nicht betroffen sind.

Für den Zeitreihenvergleich 1951 bis 2020 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 2020 in allen Regionen hoch-signifikanten Trends.

Die weitere Zunahme der Jahresmitteltemperaturen resultiert aus Temperaturzunahmen sowohl im hydrologischen Winter- als auch Sommerhalbjahr, wobei die Trendveränderungen des Sommerhalbjahres mit maximal $+1,7$ °C/70 Jahre deutlich dominieren. Im Langzeitverhalten seit 1931 ist die Temperaturzunahme im Winterhalbjahr jedoch weiterhin größer als im Sommerhalbjahr. Mit den Jahren 2015 bis 2020 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. 5) 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 Monitoringbericht 2021 auf der Internetseite von KLIWA [www.kliwa.de] als „Monitoringbericht 2021 - 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 1951–2020. Die Signifikanzniveaus sind durch unterschiedliche Schriftgrößen und -typen dargestellt.

| Region | Höhe m ü. NN | Trend der Lufttemperatur im Zeitraum 1931-2000 [°C/70 Jahre] | | | Trend der Lufttemperatur im Zeitraum 1951-2020 [°C/70 Jahre] | | |
|----------------------|-----------------|--|---------------------|---------------------|--|---------------------|---------------------|
| | | Jahr | Winter- halbjahr | Sommer- halbjahr | Jahr | Winter- halbjahr | Sommer- halbjahr |
| Rhein-Main-Region | 211 | 0.7 | 0.9 | 0.3 | 1.7 | 1.8 | 1.7 |
| Nahe-Mittelrhein | 281 | 0.6 | 0.8 | 0.2 | 1.9 | 1.9 | 1.9 |
| Unterer Main | 318 | 0.6 | 0.8 | 0.2 | 1.8 | 1.8 | 1.7 |
| Lahn | 318 | 0.5 | 0.7 | 0.2 | 1.7 | 1.8 | 1.6 |
| Mosel-Sieg | 344 | 0.6 | 0.8 | 0.4 | 1.7 | 1.7 | 1.8 |
| Eder-Diemel | 354 | 0.4 | 0.7 | 0.1 | 1.6 | 1.7 | 1.5 |
| Fulda-Werra | 372 | 0.5 | 0.8 | 0.2 | 1.8 | 1.9 | 1.7 |
| Oberer Main | 405 | 0.5 | 0.7 | 0.1 | 1.8 | 1.9 | 1.8 |
| Neckar | 427 | 0.8 | 1.0 | 0.6 | 1.9 | 1.8 | 2.0 |
| Mittlere Donau | 453 | 0.8 | 1.0 | 0.5 | 2.0 | 2.0 | 2.0 |
| Hoch- u. Oberrhein | 474 | 0.7 | 0.8 | 0.4 | 1.7 | 1.6 | 1.7 |
| Bayer. Mittelgebirge | 529 | 0.6 | 0.9 | 0.2 | 1.9 | 1.9 | 1.9 |
| Isar-Inn | 605 | 0.8 | 1.0 | 0.5 | 1.9 | 1.9 | 1.9 |
| Iller-Lech | 655 | 0.8 | 0.9 | 0.5 | 1.7 | 1.7 | 1.8 |
| Obere Donau | 694 | 0.7 | 0.8 | 0.5 | 1.7 | 1.6 | 1.8 |

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 Rhein-Main-Region: Der lineare Trend der Jahresmitteltemperaturen betrug im Zeitraum 1931 bis 2000 +0,7 °C, für den Zeitraum 1951 bis 2020 hingegen bereits +1,7 °C. Daraus ergibt sich, dass sich die Erwärmung in den letzten 20 Jahren weiter verstärkt hat und die Jahresmitteltemperatur im Durchschnitt deutlich zugenommen hat.



5 Niederschlag

5.1 Bisherige Auswertungen

Im KLIWA-Heft 7 [KLIWA 2005c] wurde das Langzeitverhalten des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg und Bayern im Zeitraum 1931 bis 1997 für die damals 33 KLIWA-Untersuchungsgebiete dargestellt. Das Langzeitverhalten der Starkniederschlagshöhen wurde stationsbezogen für den Zeitraum 1931 bzw. 1901 bis 2000 untersucht und im KLIWA-Heft 8 [KLIWA 2006] veröffentlicht. Darauf aufbauend wurde alle fünf Jahre ein Monitoringbericht zur Fortführung der Auswertungen geschrieben. Mehr Details zum methodischen Vorgehen und dem aktuellen KLIWA-Gebiet mit 15 Regionen und 53 Untersuchungsgebieten siehe Kapitel 3.

Im Rahmen des Projektes „Messnetz 2000“ wurde seit 1998 im DWD eine umfangreiche Automatisierung des nebenamtlichen Messnetzes durchgeführt. Als Folge dieser Automatisierung wurden fast die Hälfte der nebenamtlichen Niederschlagsstationen, die nicht automatisiert werden konnten, aufgelöst. Damit hat sich die Datenbasis für eine Stationsweise Auswertung der maximalen Tagesniederschläge in Süddeutschland erheblich verringert. Deshalb werden auch diese Auswertungen nur noch gebietsweise für die 53 KLIWA-Untersuchungsgebiete bzw. 15 KLIWA-Regionen durchgeführt. Untersuchungen haben ergeben, dass der höchste Gebietsniederschlag einer Dauerstufe in einem Zeitraum, z. B. in den hydrologischen Halbjahren, die Starkniederschlagshöhen der Dauerstufe, gewonnen aus Stationswerten, gut repräsentiert.

Bis jetzt ergaben sich folgende Ergebnisse: Der mittlere Niederschlag im Winterhalbjahr zeigte für alle Untersuchungsgebiete zwischen den Jahren 1931 bis 2015 einen positiven Trend mit regional hoher Signifikanz. Es waren Zunahmen von bis zu 22 % und mehr insbesondere am Oberen Main, im Bayerischen Mittelgebirge sowie an der Donau zu finden. Insgesamt waren die positiven Trends und auch die Signifikanzen rückläufig im Vergleich zu den vorherigen Auswertungen. Die Trends des mittleren Gebietsniederschlags im Sommerhalbjahr waren hingegen uneinheitlich (-13 % bis +4 %) und nicht signifikant

Bei den maximalen Niederschlägen zeigten die Zeitreihen der halbjährlichen Tageshöchstwerte im Winterhalbjahr von 1931 bis 2015 fast überall positive Trendwerte, deren Signifikanz war allerdings unterschiedlich und variiert räumlich sehr stark. Im Nordosten Bayerns waren hoch signifikante Zunahmen von bis zu 33 % zu finden und bildeten eine Voraussetzung für die Zunahme von Hochwassern im Winterhalbjahr. Im Sommerhalbjahr waren die Trends uneinheitlich und überwiegend nicht signifikant. Eine Bestätigung der erwarteten Zunahme von kleinräumigen und kurzzeitigen Starkniederschlägen hoher Intensität insbesondere im Sommer war auf Basis der vorliegenden Auswertung nicht möglich.

5.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung

Ziel der durchgeführten Auswertungen ist es, die Untersuchungen zu beiden Aspekten des Niederschlagsverhaltens (mittlere Gebiets- und Starkniederschläge) bis zum Jahr 2020 auszudehnen. 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 53 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. 1200 zu verzeichnen ist. 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 das Jahr 2020 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 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, oder, wenn sie auf eine Station treffen, dann ein stärkeres Gewicht auf den Gebietsniederschlag haben, als beim Vorhandensein eines dichteren Messnetzes. Dabei spielt auch die Niederschlagsklimatologie eine Rolle. Besonders im unteren Donaugebiet werden hohe sommerliche Niederschlagshöhen oft von sogenannten Vb-Wetterlagen hervorgerufen. Sie erzeugen hohen flächenhaften Niederschlag, der auch von wenigen Stationen im Gebiet gut erfasst wird. Demgegenüber überwiegen im Neckargebiet konvektive Niederschlagsereignisse. Im betrachteten Rheineinzugsgebiet kommt noch der Stauereffekt des Schwarzwaldes hinzu. In Rheinland-Pfalz gibt es durch Rhein und Mosel sowie die Mittelgebirge Hunsrück, Westerwald, Eifel sowie Taunus lokale Effekte, die die Niederschlagsmuster deutlich beeinflussen. Insgesamt muss festhalten werden, dass der maximale Sommerniederschlag deutlich ungenauer erfasst werden kann, als der winterliche. Entsprechend sind Trendaussagen 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 2020 für die KLIWA-Regionen Mosel-Sieg, Neckar und Isar-Inn sind in Abb. 9 beispielhaft abgebildet. Die Zeitreihen sind von einer hohen Variabilität von Jahr zu Jahr geprägt. Dies hat großen Einfluss auf die auch dargestellten linearen Trends. 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 2020 für die mittlere Gebietsniederschlagshöhe im hydrologischen **Winterhalbjahr** sind in Abb. 10 für die 53 KLIWA-Untersuchungsgebiete dargestellt. In fast allen KLIWA-Gebieten findet man zunehmende Trends, wobei deren Stärke mit -6 bis $+22$ % und auch deren Signifikanz unterschiedlich ausfallen. Die stärksten Trends (> 15 %), die auch hoch signifikant sind, liegen im Bereich Nord- und Mittelbayern. Keine Signifikanzen finden sich vor allem in Hessen, Rheinland-Pfalz, dem Saarland und im nördlichen Baden-Württemberg.

Die Abb. 11 zeigt das Trendverhalten der Gebietsniederschlagshöhen im hydrologischen **Sommerhalbjahr**. Für den Zeitraum 1931 bis 2020 sind nur schwache und vorwiegend nicht signifikante Änderungen (-15 % bis $+3$ %) zu finden. Dabei ist der Trend bei der Mehrheit der Gebiete negativ, aber in der Regel nicht signifikant. Im Rhein-Main-Neckargebiet und in einem Gebiet der Mosel (Mo1) ist ein schwach signifikanter Trend mit einer Abnahme von -10 % bis -15 % nachzuweisen.

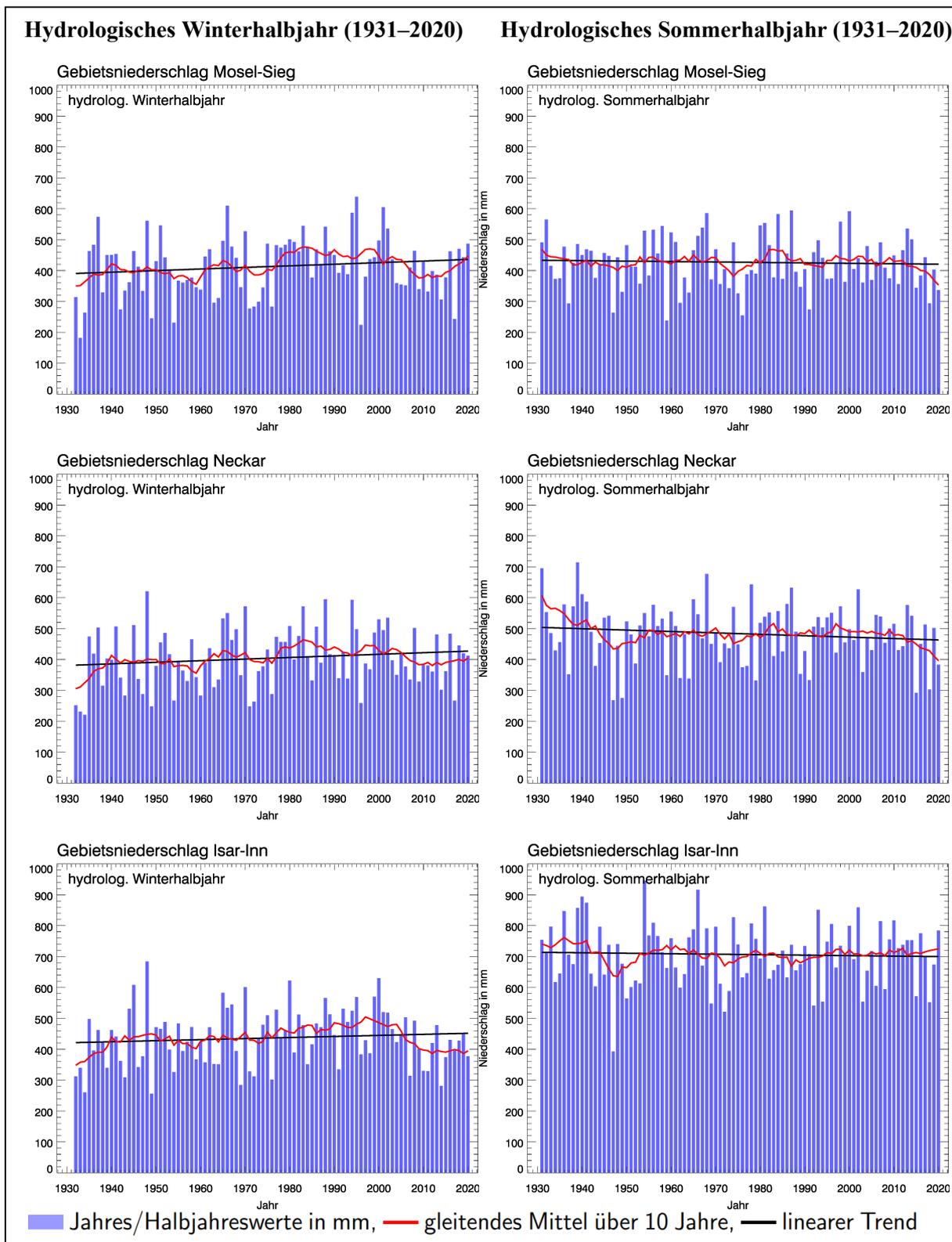


Abb. 9: Höhe und Trend der Gebietsniederschläge in den KLIWA-Regionen Mosel-Sieg, Neckar und Isar-Inn für die hydrologischen Halbjahre im Zeitraum 1931–2020.

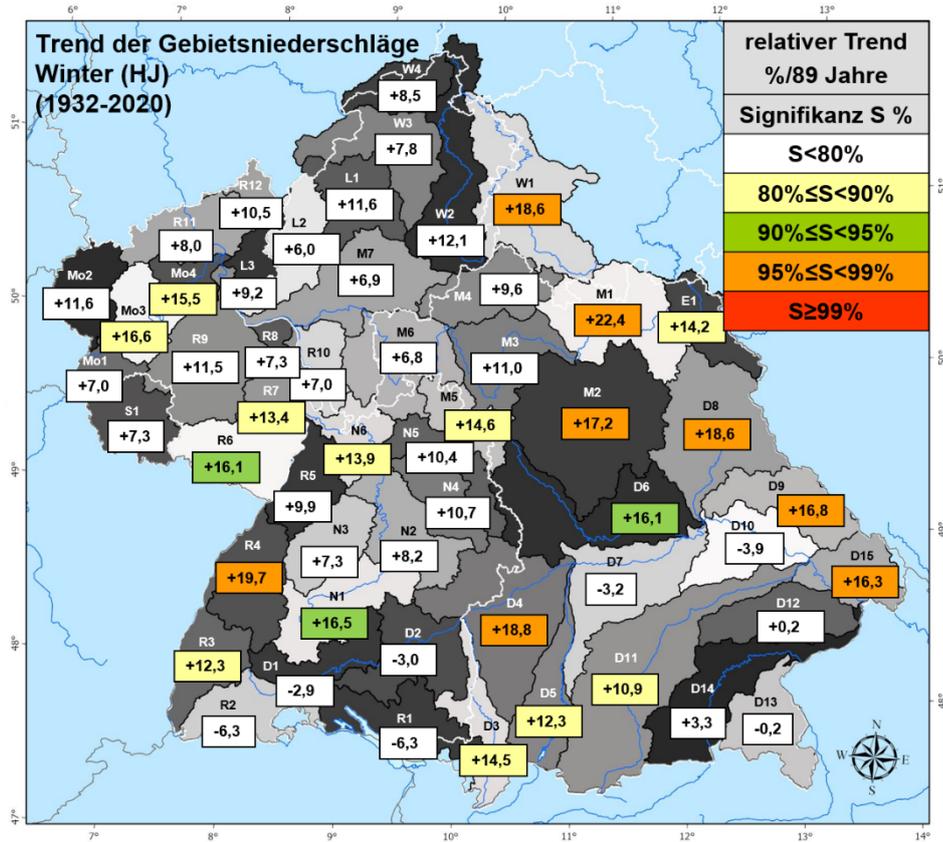


Abb. 10: Entwicklung des mittleren Gebietsniederschlags im hydrologischen Winterhalbjahr, relativer Trend (Änderung in Prozent vom Mittelwert 1932–2020).

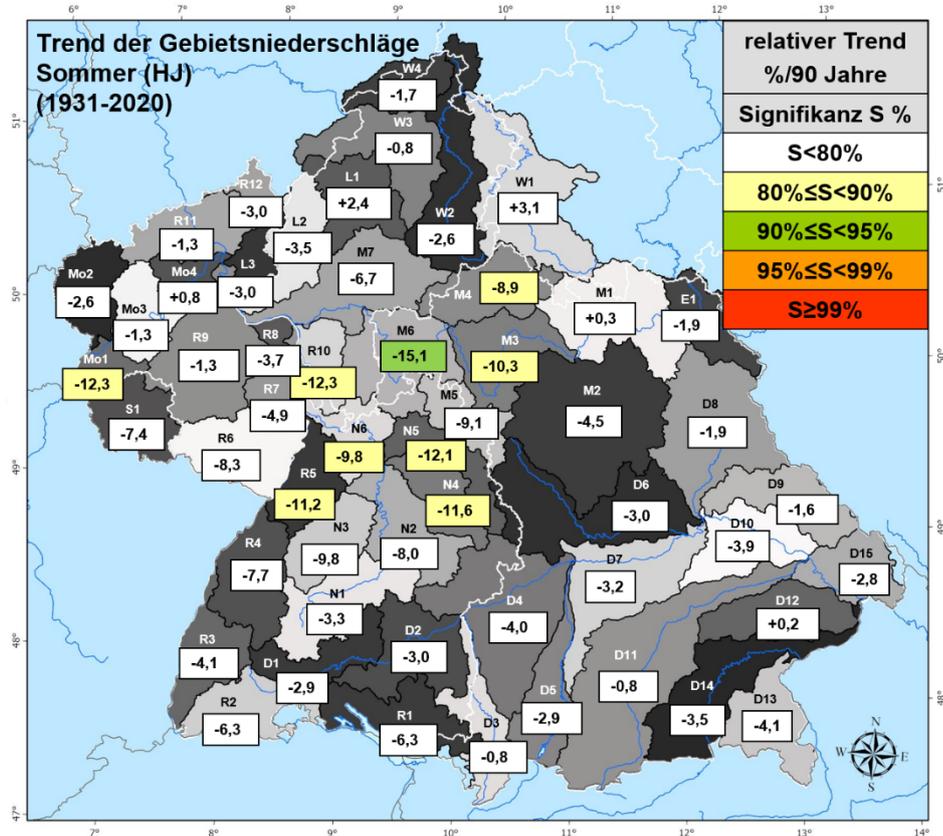


Abb. 11: Entwicklung des mittleren Gebietsniederschlags im hydrologischen Sommerhalbjahr, relativer Trend (Änderung in Prozent vom Mittelwert 1931–2020).



Insgesamt lässt sich für die Auswertungen zwischen 1931 und 2020 bilanzieren, dass in sehr vielen Regionen des KLIWA-Gebiets gerade die letzten Jahre sehr trocken gewesen sind, was zu einer generellen Abschwächung der positiven Gesamttrends geführt hat. Die hohe Variabilität der Gebietsniederschläge von Jahr zu Jahr hat dabei einen erheblichen Einfluss auf die berechneten linearen Trends.

Die **Trendänderungen der Halbjahresniederschläge** werden in Tabelle 2 für die 70-jährigen Zeiträume 1931 bis 2000 und 1951 bis 2020 betrachtet. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten wurde auf eine einheitliche Länge der betrachteten Zeitreihen geachtet. Dabei stellt sich jedoch die Problematik der unterschiedlichen Startzeitpunkte 1931, bzw. 1951 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. Dies macht noch einmal deutlich welche hohe Jahr-zu-Jahr Variabilität die Gebietsniederschläge aufweisen und wie empfindlich darauf die Trendberechnungen reagieren.

Im Vergleich für das Winterhalbjahr zeigt sich in den meisten Gebieten eine Abschwächung der Trends, d. h. die positiven Trends, die fast ausnahmslos signifikant waren für den 1931 bis 2000 sind im zweiten Zeitraum 1951 bis 2020 nicht mehr signifikant und haben sich zum Teil sogar in nicht signifikante negative Trends verkehrt. Sie bleiben zwar größtenteils in ihrer Tendenz erhalten (vgl. Tab. 2), jedoch hat die Signifikanz der Trends in vielen Gebieten stark abgenommen.

Tab. 2: Überblick über die Veränderung des Trendverhaltens der mittleren Gebietsniederschläge der hydrologischen Halbjahre in den 53 KLIWA-Untersuchungsgebieten im Vergleich der Zeiträume 1931–2000 und 1951–2020.

| Tendenzen der mittleren Gebietsniederschläge | Untersuchungszeitraum von | |
|---|---------------------------|------------|
| | 1931–2000* | 1951–2020* |
| Hydrologisches Winterhalbjahr (Nov. – Apr.) | | |
| ↘ KLIWA-Untersuchungsgebiete mit abnehmendem Trend / signifikant | – / – | 12 / – |
| ↗ KLIWA-Untersuchungsgebiete mit zunehmendem Trend / signifikant | 53 / 52 | 41 / – |
| Hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai – Okt.) | | |
| ↘ KLIWA-Untersuchungsgebiete mit abnehmendem Trend / signifikant | 35 / 1 | 37 / – |
| ↗ KLIWA-Untersuchungsgebiete mit zunehmendem Trend / signifikant | 18 / – | 16 / – |

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

Für das Sommerhalbjahr zeigt der Vergleich der zwei 70-jährigen Zeiträume in Tabelle 2 keine klare Veränderung zwischen 1931 bis 2000 zu 1951 bis 2020. Die überwiegende Zahl an Untersuchungsgebieten weist für die Zeiträume abnehmende Trends auf. Alle Trends sind schwach wie auch schon bei den Gesamttrends 1931 bis 2020 (Abb. 11). Bei der Interpretation der Ergebnisse für das Sommerhalbjahr ist jedoch Vorsicht geboten, da bis auf eine Ausnahme alle Trends weiterhin nicht signifikant sind. Außerdem ist bei hydrologischer Wirksamkeit die Verteilung der Niederschläge innerhalb der Halbjahre sehr entscheidend.

Starkniederschläge

Zusätzlich zur Betrachtung der mittleren Gebietsniederschläge wurden die halbjährlichen Maximalwerte der eintägigen Gebietsniederschlagshöhen im Rahmen des Monitorings untersucht. Vergleichsauswertungen haben gezeigt, dass sich die gebietsbezogenen Betrachtungen gut mit stationsbezogenen Auswertungen decken. In den Abb. 12 und Abb. 13 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. 12) findet man im Zeitraum 1931 bis 2020 in fast ganz Süddeutschland zunehmende bis stark zunehmende maximale eintägige Gebietsniederschlagshöhen (bis +33 %). Neun der 53 Untersuchungsgebiete zeigen allerdings auch nicht signifikante Abnahmen. Die höchsten Zunahmen (hoch signifikant) finden sich im Bereich nordöstliches Bayern und in der Bodenseeregion. Dort liegen die Zunahmen zwischen +20 und 33% und sind damit deutlich höher als die Zunahmen bei den mittleren Gebietsniederschlagshöhen. Im Gegensatz zu den mittleren Gebietsniederschlagshöhen gibt es aber auch Gebiete, die keine signifikanten Zunahmen oder leichte Abnahmen aufweisen z. B. im nördlichen Hessen.

Im **Sommerhalbjahr** (Abb. 13) zeigen die Trends der Zeitreihe 1931 bis 2020 bei den maximalen eintägigen Gebietsniederschlagshöhen ein deutlich anderes Bild, als beim mittleren Gebietsniederschlag. In der Mehrheit der Gebiete sind zunehmende Trends mit maximal +28 % zu finden. Aufgrund der hohen Variabilität gibt es auch stärkere Abnahmen (bis -18 %). All diese Trends sind aber, mit Ausnahme von wenigen Gebieten, nicht signifikant.

Insgesamt zeigt sich aber auch für die Maximalwerte der eintägigen Gebietsniederschlagshöhen wie schon für die Gebietsniederschläge eine hohe Jahr-zu-Jahr-Variabilität, die zu großen Schwankungen in den berechneten linearen Trends führt.

Für die Erstellung des vorliegenden Berichts sind zunächst umfangreiche Auswertungen für den Niederschlag für die einzelnen KLIWA-Untersuchungsgebiete (vgl. Abb. 5) durch den KLIWA-Partner DWD durchgeführt worden POTTGIESSER 2018, die hier selbst nicht oder nur in stark zusammengefasster Form dargestellt werden konnten. Diese sind in Form einer Ergänzung zu diesem Bericht auf der Internetseite von KLIWA [www.kliwa.de] als „Monitoringbericht 2021 - Niederschlag - Zusätzliche Auswertungen für die KLIWA-Untersuchungsgebiete“ zum Download verfügbar.

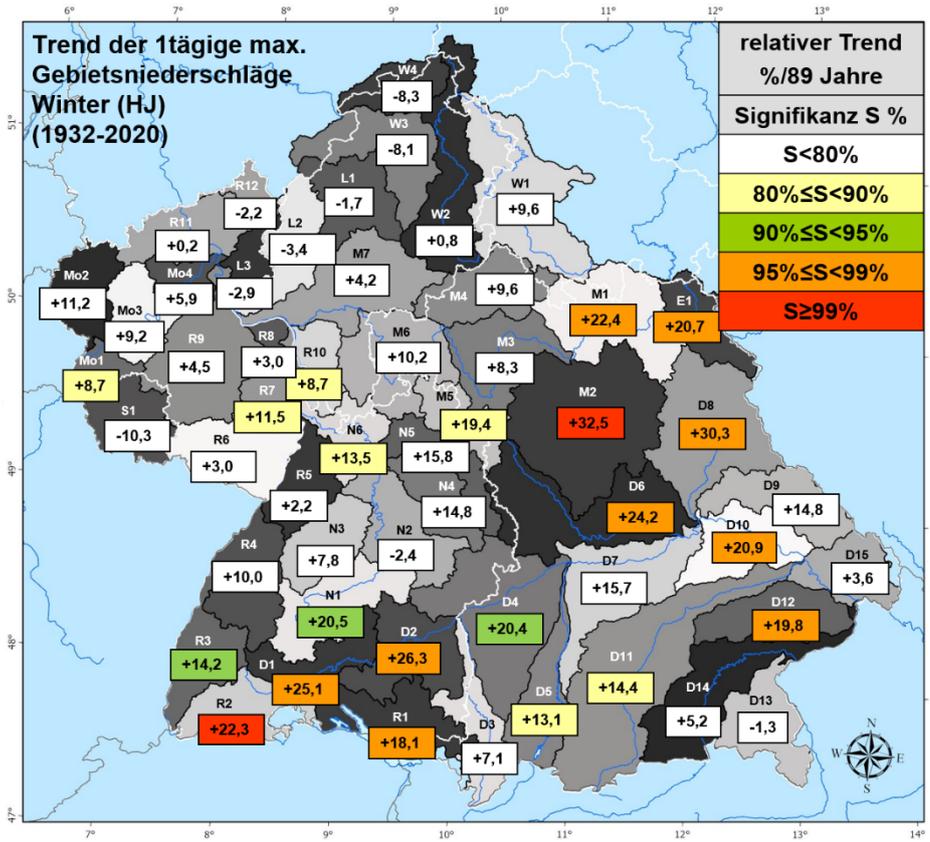


Abb. 12: Entwicklung der max. 1-tägigen Gebietsniederschlagshöhen im hydrologischen Winterhalbjahr, relativer Trend (Änderung in Prozent vom Mittelwert 1932–2020).

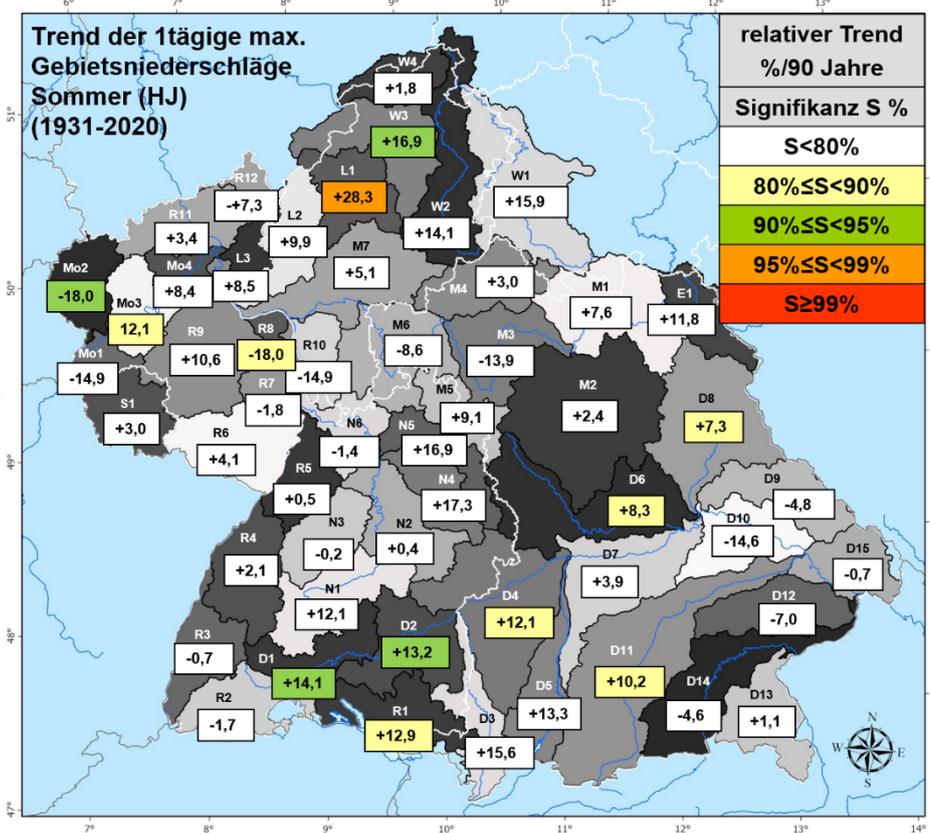


Abb. 13: Entwicklung der max. 1-tägigen Gebietsniederschlagshöhen im hydrologischen Sommerhalbjahr, relativer Trend (Änderung in Prozent vom Mittelwert 1931–2020).

6 Hochwasserabflüsse

6.1 Bisherige Auswertungen

Mit dem Ziel mögliche Auswirkungen des Klimawandels sichtbar zu machen, wurde im Jahr 2000 erstmals das Trendverhalten beobachteter Hochwasserabflüsse an 107 repräsentativen Pegeln in Bayern und Baden-Württemberg untersucht [KLIWA 2002]. Basierend auf Abflusszeitreihen von 1932 bis 1998 wurde festgestellt, dass in diesem Zeitraum keine signifikante flächendeckende Veränderung im Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Bayern und Baden-Württemberg eingetreten war. Wurden die Abflusszeitreihen hingegen auf die jüngsten 30 bis 40 Jahre verkürzt, wurde eine zunehmende Tendenz an Hochwasserereignissen und deren Hochwasserabflüsse ermittelt. Die Untersuchung der monatlichen Abflusshöchstwerte zeigte dabei insbesondere eine Erhöhung in den Wintermonaten [KLIWA 2002]. Diese Ergebnisse bestätigten sich im ersten Monitoringbericht [KLIWA 2008b]. In Bayern kam es durch die Verlängerung der Zeitreihe bis ins Jahr 2005 zudem zu einer weiteren Verschärfung der Hochwassersituation im Winterhalbjahr. Sowohl die Anzahl an Trends, als auch deren Signifikanz nahm zu. In den Monitoringberichten 2011 und 2016 [KLIWA 2011b, KLIWA 2016] konnten, unter Hinzunahme von Rheinland-Pfalz mit 25 Pegeln, diese Feststellungen bestätigt werden, allerdings schwächten sich die zunehmenden Trends und die Anzahl der Pegel mit signifikanten Änderungen ab. Dies deutete auf eine erneute Veränderung des allgemeinen Hochwasserabflussverhaltens nach 2000 hin. Analog zum Monitoringbericht 2008 [KLIWA 2008b] 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

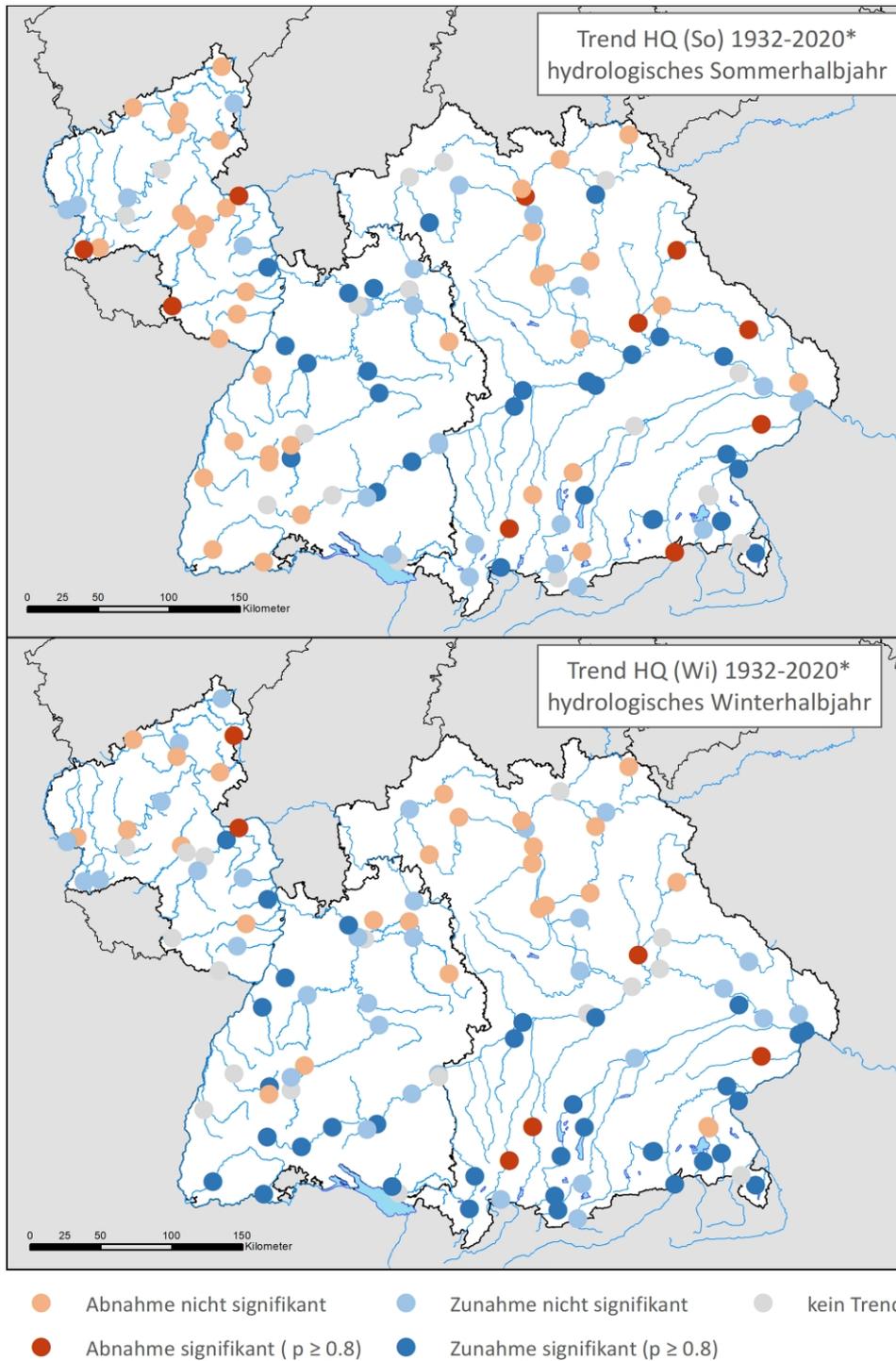
In diesem Kurzbericht werden die bis 2020 verlängerten Zeitreihen für Bayern und Baden-Württemberg ab 1932 bzw. für Rheinland-Pfalz ab 1971 betrachtet, ausgewertet und mit den Zeiträumen der vorangegangenen Monitoringberichte verglichen [KLIWA 2016]. Als repräsentative Datengrundlage für das Trendverhalten dienen, wie bei den bisherigen Auswertungen, 116 ausgewählte Pegel in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz (vgl. Abb. 14). Die 25 betrachteten Pegel aus Rheinland-Pfalz weisen mit einem späteren Datenbeginn teilweise verkürzte Zeitreihen auf. Aus diesem Grund startet die Auswertung der rheinland-pfälzischen Pegel erst ab 1971. Gegenüber den vorherigen Monitoringberichten können Abweichungen auftreten, da eine aktualisierte Datengrundlage der Landesämter vorliegt.

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

Ein Trend wird dabei als signifikant bezeichnet, wenn das Signifikanzniveau $\alpha \geq 80\%$ ist. Im Vergleich zu den vorangegangenen Monitoringberichten, wird neben den beiden Kategorien signifikant / nicht signifikant, auch das generelle Vorliegen eines Trends ausgewiesen. Eine Änderung des Abflussverhaltens wird als Trend bezeichnet, wenn die Änderung mindestens 5 % vom Mittelwert beträgt. Geringfügigere Änderungen werden nicht mehr als Trend klassifiziert.



Zusätzlich wurde der mittlere Jahresgang der Monatshöchstwerte der Abflüsse betrachtet. Um aufgetretene Veränderungen zu erkennen, wurde die verfügbare Zeitreihe basierend auf vorherigen Auswertungen im Jahr 1974 geteilt und für das hydrologische Jahr und die Halbjahre getrennt ausgewertet (vgl. Abb. 20 bis Abb. 22). In früheren Untersuchungen wurde festgestellt, dass das Jahr 1974 für viele Pegel in Baden-Württemberg und Bayern einen Bruchpunkt darstellt.



*Pegel in Rheinland-Pfalz zeigen den Trend von 1971-2020

Abb. 14: Lage der betrachteten 116 Pegel für die Untersuchungen zum Trendverhalten der Hochwasserabflüsse in Bayern (61), Baden-Württemberg (30) und Rheinland-Pfalz (25) sowie die räumliche Verteilung der Trends.

6.3 Neue Ergebnisse

Insgesamt überwiegen für beide Halbjahre (Abb. 14) für den Zeitraum 1932 bis 2020 zunehmende Trends der Höchstabflüsse. Abnehmende Trends können vor allem im Sommerhalbjahr im westlichen und nördlichen Teil des Untersuchungsgebiets beobachtet werden. Die Ergebnisse der Trenduntersuchungen sind zusammengefasst für alle 116 Pegel in Abb. 15 für das Winterhalbjahr und in Abb. 16 für das Sommerhalbjahr dargestellt. Außerdem sind die zusammenfassenden Trendanalysen der unterschiedlichen Zeiträume bezogen auf die Endjahre der vergangenen Monitoringberichte (2000, 2005, 2010, 2015) dargestellt.

Die durchgeführte Trendanalyse der Hochwasserabflüsse, ab 1932 für Baden-Württemberg und Bayern und ab 1971 für Rheinland-Pfalz, zeigt bis 2020 für das hydrologische **Gesamtjahr** (nicht dargestellt) an 64 von 116 Pegeln (55 %) einen positiven Trend, von denen an 23 Pegeln die Trends signifikant sind. 33 Pegel (28 %) weisen eine Abnahme auf. Die Abnahmen sind an lediglich 6 Pegeln signifikant. Bei 19 von 116 Pegeln sind die Änderungen so gering ($< 5\%$), dass von keinem Trend ausgegangen wird.

Im hydrologischen **Winterhalbjahr** zeigen 58 % der Pegel steigende und 28 % fallende Trends bis 2020 an. 52 % der steigenden Trends und nur 19 % der fallenden Trends sind signifikant. 15 % der Pegel weisen keinen Trend auf. Bei Betrachtung der einzelnen Bundesländer treten Unterschiede im Verhalten der Hochwasserabflüsse auf. In Bayern und Baden-Württemberg (Auswertungszeitraum 1932-2020) überwiegt der Anteil der Pegel mit positivem Trend deutlich. In Rheinland-Pfalz (Auswertungszeitraum 1971-2020) sind die Zu- und Abnahmen nahezu identisch, mit einer geringen Mehrheit der positiven Trends. Vergleicht man die aktuellen Ergebnisse mit den Zeiträumen der vorangegangenen Monitoringberichte (Abb. 15), zeigt sich folgendes Bild: Insgesamt werden bei den betrachteten Pegeln die Anzahl an zunehmenden Trends weniger und die Anzahl an abnehmenden Trends mehr. Auffällig ist zudem, dass die signifikant zunehmenden Trends 2010 deutlich abgenommen haben und seitdem konstant sind. Durch die Zeitreihenverlängerung bis 2020 schwächen sich die vorhandenen signifikant positiven Trends gegenüber den Betrachtungen bis 2015 daher nicht weiter ab. Die signifikant abnehmenden Trends bleiben ebenfalls nahezu konstant.

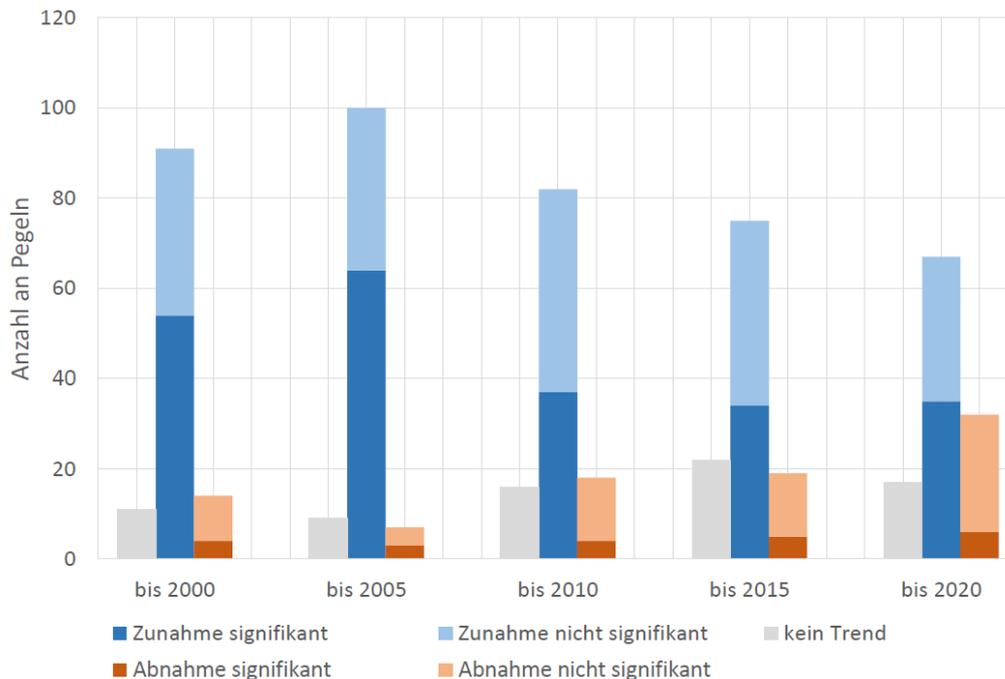


Abb. 15: Überblick über das Trendverhalten im hydrologischen Winterhalbjahr der Hochwasserabflüsse ab 1932 an den 116 Pegel in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz im Vergleich der Zeiträume (die Auswertung der rheinland-pfälzischen Pegel beginnt erst 1971).

Im hydrologischen **Sommerhalbjahr** zeigen 45 % der ausgewählten Pegel (52 Pegel) steigende und 41 % (47 Pegel) fallende Trends bei den Hochwasserabflüssen an. Davon sind ungefähr knapp über die Hälfte der Zunahmen und ca. 21 % der Abnahmen signifikant. 15 % der Pegel (17 Pegel) weisen keinen Trend auf. Beim Blick auf die Bundesländer weisen Bayern und Baden-Württemberg ähnliche Tendenzen auf. In diesen beiden Ländern überwiegen die Zunahmen. In Rheinland-Pfalz sind negative Trends im Sommerhalbjahr häufiger. Der Vergleich der Untersuchungsergebnisse für das Sommerhalbjahr für die Zeiträume 1932 bzw. 1971 bis 2000, 2005, 2010, 2015 und 2020 (Abb. 16) zeigt, dass die Zunahmen über die Zeit langsam weniger werden und dass die Anzahl der Pegel mit abnehmenden Trend langsam größer wird. Anzumerken ist, dass die Anzahl der signifikanten Trends bei den Zu- und Abnahmen jedoch nahezu konstant bleibt.

In den Abb. 17 bis Abb. 19 sind exemplarisch die Trendanalysen der Jahreshöchstwerte der Pegel Donauwörth, Bad Rotenfels und Martinstein 2 für das Gesamt- und die beiden hydrologischen Halbjahre dargestellt. Während die beiden Pegel an Donau (BY) und Murg (BW) vorwiegend zunehmende Trends von 1932 bis 2020 zeigen, nehmen die Trends der Höchstabflüsse bei Martinstein (ab 1972) ab. Im Winterhalbjahr beläuft sich die Zunahme auf eine Erhöhung der Hochwasserabflüsse (Donauwörth: +21 % / Bad Rotenfels: +32 % / Martinstein 2: -1 %), während im Sommerhalbjahr geringere Veränderungen bzw. sogar leichte Abnahmen (Donauwörth: +35 % / Bad Rotenfels: -9 % / Martinstein 2: -5 %) auftreten (vgl. Abb. 17 bis Abb. 19). Diese Entwicklung deckt sich mit der Auswertung des Trendverhaltens.

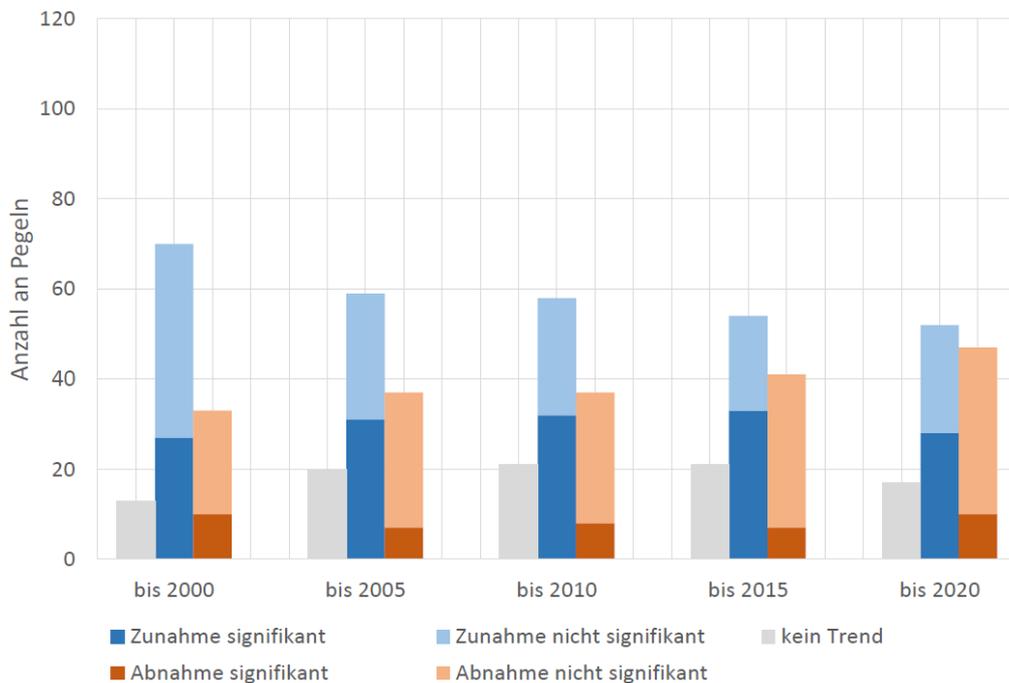


Abb. 16: Überblick über das Trendverhalten im hydrologischen Sommerhalbjahr der Hochwasserabflüsse ab 1932 an den 116 Pegel in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz im Vergleich der Zeiträume (die Auswertung der rheinland-pfälzischen Pegel beginnt erst 1971).

Durch die Datenverlängerung bis 2020 ergeben sich gegenüber den vorausgegangenen Auswertungen 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, aufgrund der Verlängerung bis 2015, abnehmende Tendenzen auftreten.

Die beobachtete Entwicklung bei den Jahres- und Halbjahreswerten wird durch die Auswertung des **Jahresganges der mittleren monatlichen Abflusshöchstwerte (MoMHQ)** weiter untermauert. In den Abb. 20 bis Abb. 22 sind diese exemplarisch für die Pegel Donauwörth, Bad Rotenfels und Martinstein 2 dargestellt. Zusätzlich wurde die Zeitreihe im Jahr 1974 geteilt. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf mögliche Veränderungen der monatlichen mittleren Höchstwerte, insbesondere in den abflussstarken Zeiten. Die mittleren Hochwasserabflüsse (MHQ) der Zeitperiode von 1974 bis 2020 liegen mehrheitlich über dem Mittelwert der Gesamtzeitreihe und damit über der früheren Periode bis 1973.

Diese Zunahme wird überwiegend durch eine Erhöhung der Hochwasser im hydrologischen Winterhalbjahr hervorgerufen (Donauwörth: +22 %, Bad Rotenfels: +24 %, jeweils im Vergleich zur Periode bis 1973 / Martinstein 2: 1 % im Vergleich zur Gesamtperiode), während im Sommerhalbjahr geringere Veränderungen bzw. sogar leichte Abnahmen (Donauwörth: +17 %, Bad Rotenfels: -1 % jeweils im Vergleich zur Periode bis 1973 / Martinstein 2: ~0 % im Vergleich zur Gesamtperiode) auftreten (vgl. Abb. 17 bis Abb. 19). Durch die Datenverlängerung bis 2020 ergeben sich gegenüber den bisherigen Auswertungen im Monitoringbericht 2016 [KLIWA 2016] nur geringfügige prozentuale Änderungen. Eine Ausnahme stellt der Pegel Martinstein 2 dar, an dem im Sommerhalbjahr abnehmende Tendenzen aufgetreten sind.

Insgesamt lässt sich aus den Untersuchungen schlussfolgern, dass für den gesamten betrachteten Zeitraum 1932 bis 2020 weiterhin überwiegend steigende Hochwasserabflüsse im Gesamtjahr, im Winterhalbjahr und in abgeschwächter Form auch im Sommerhalbjahr zu verzeichnen sind. Von den Zunahmen sind über 50 % der Trends signifikant mit Ausnahme der Pegel in Rheinland-



Pfalz. Durch die Zeitreihenverlängerung bis 2020 schwächten sich die Trends gegenüber den Betrachtungen bis 2015 nicht weiter ab. Besonders im Winterhalbjahr hat die Anzahl an nicht signifikanten negativen Trends jedoch zugenommen.

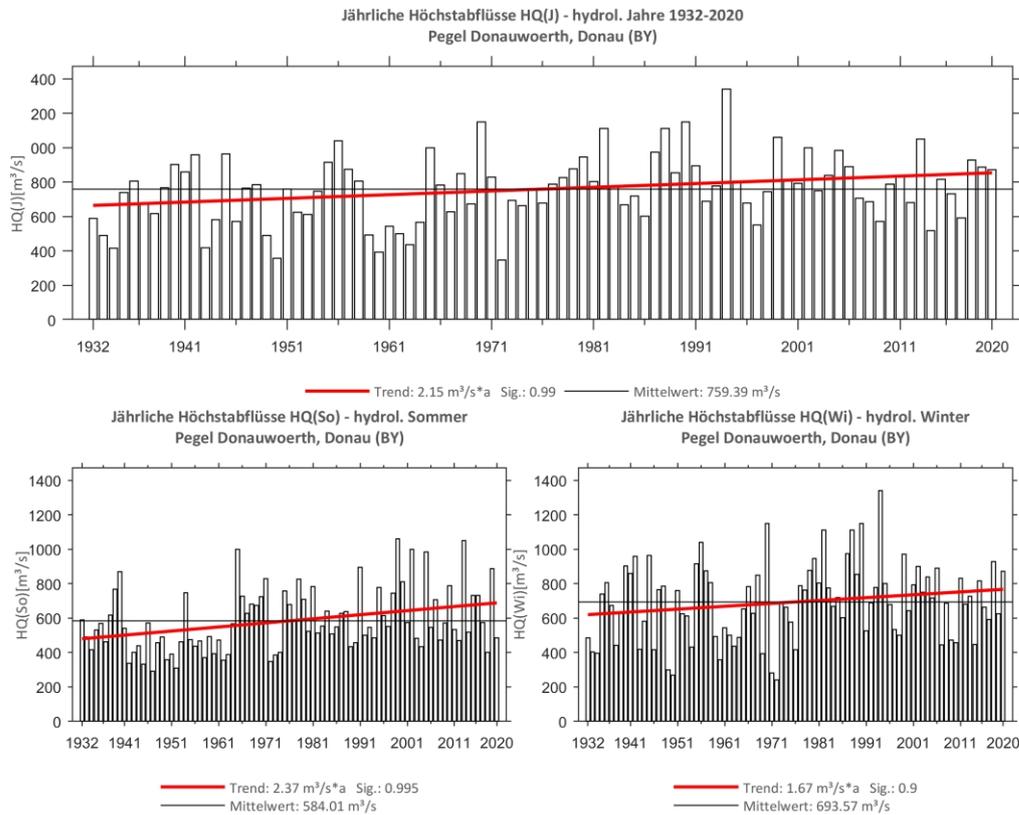


Abb. 17: Ergebnisse der Trenduntersuchung von jährlichen Höchstabflüssen am Beispiel des Pegels Donauwörth für den Zeitraum 1932–2020.

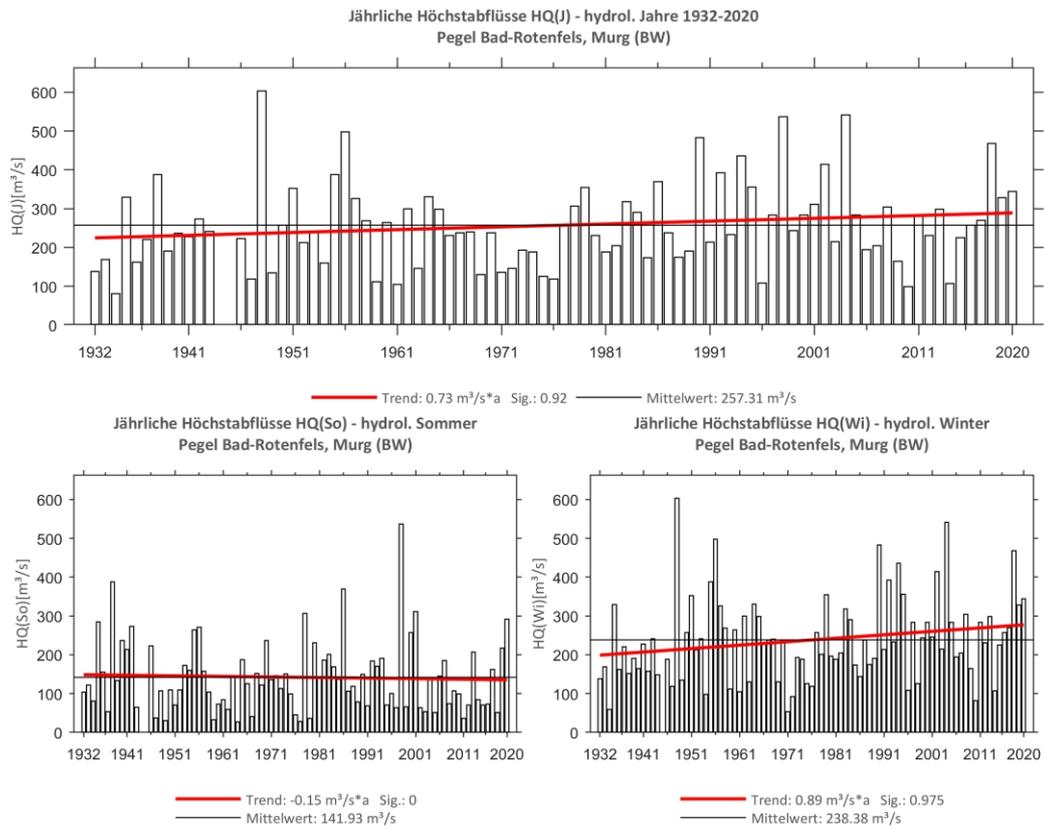


Abb. 18: Ergebnisse der Trenduntersuchung von jährlichen Höchstabflüssen am Beispiel des Pegels Bad Rotenfels für den Zeitraum 1932–2020.

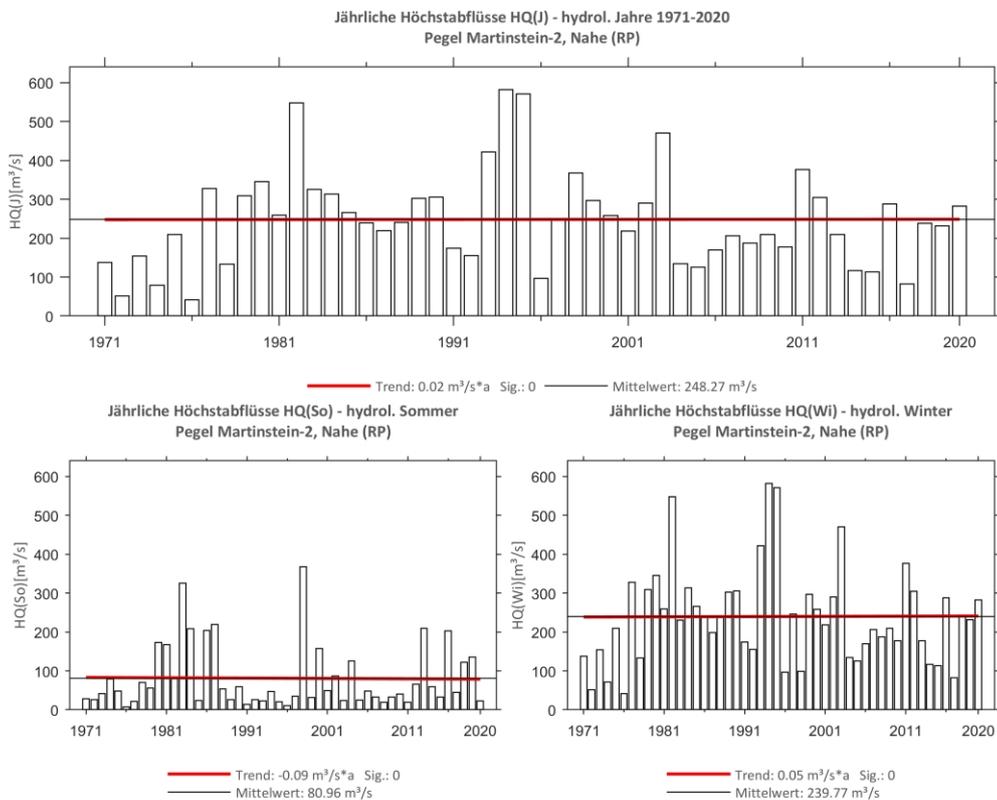


Abb. 19: Ergebnisse der Trenduntersuchung von jährlichen Höchstabflüssen am Beispiel des Pegels Martinstein 2 für den Zeitraum 1971–2020.

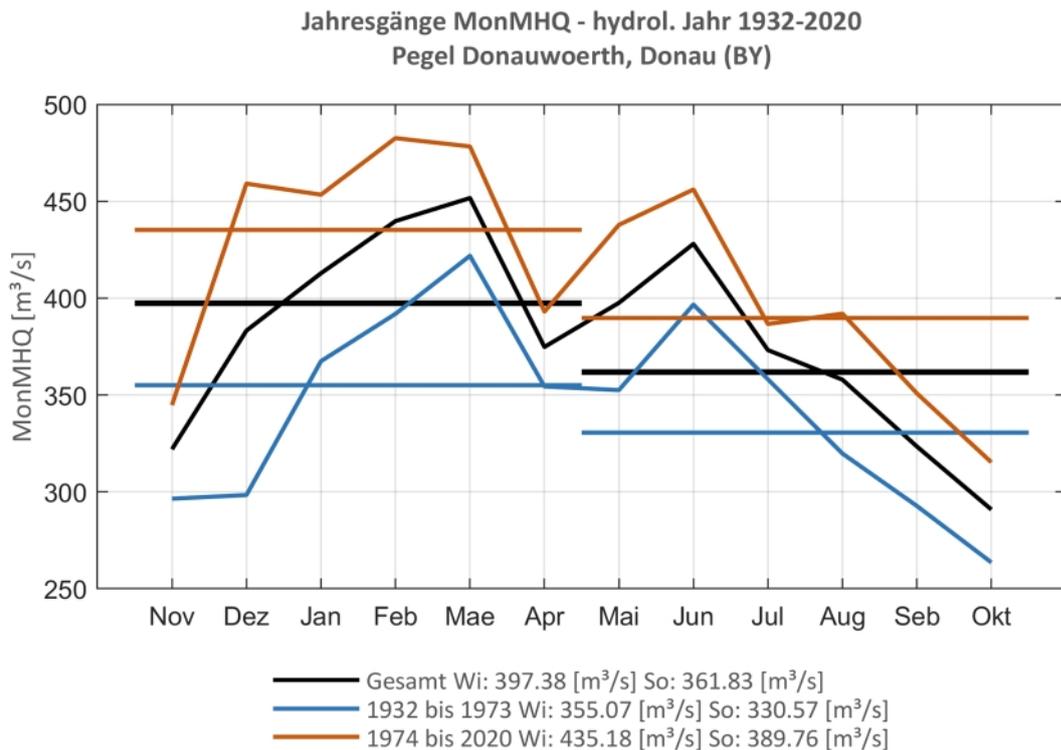


Abb. 20: Jahresgang des monatlichen mittleren Höchstabflusses und der Halbjahresmittel am Beispiel des Pegels Donauwörth für die gesamte Zeitreihe und die beiden Teilzeitreihen 1932–1973 und 1974–2020

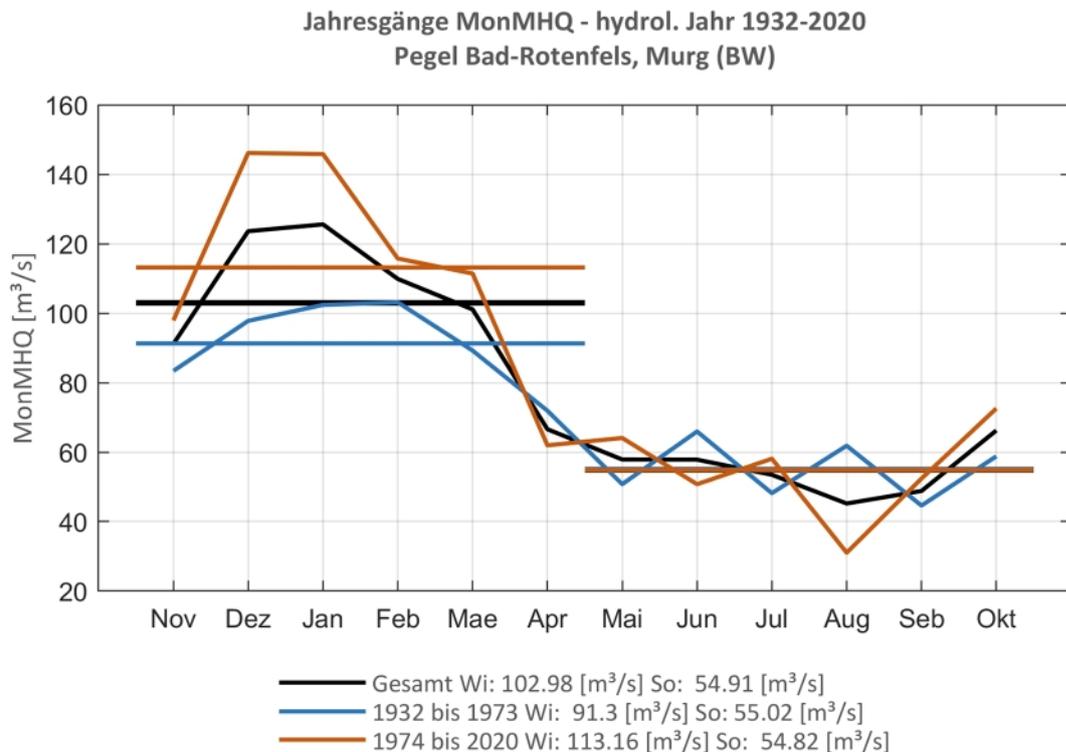


Abb. 21: Jahresgang des monatlichen mittleren Höchstabflusses und der Halbjahresmittel am Beispiel des Pegels Bad Rotenfels für die gesamte Zeitreihe und die beiden Teilzeitreihen 1932–1973 und 1974–2020.

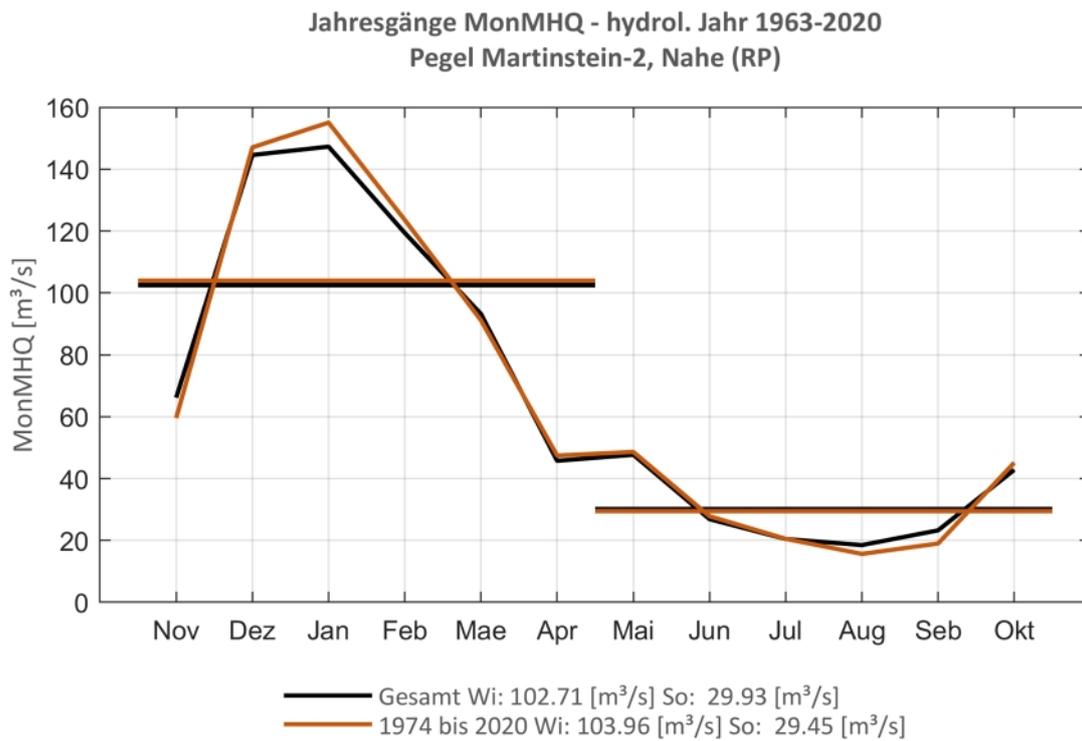


Abb. 22: Jahresgang des monatlichen mittleren Höchstabflusses und der Halbjahresmittel am Beispiel des Pegels Martinstein 2 für die gesamte Zeitreihe und die Teilzeitreihe 1974–2020.



7 Niedrigwasserabflüsse

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.

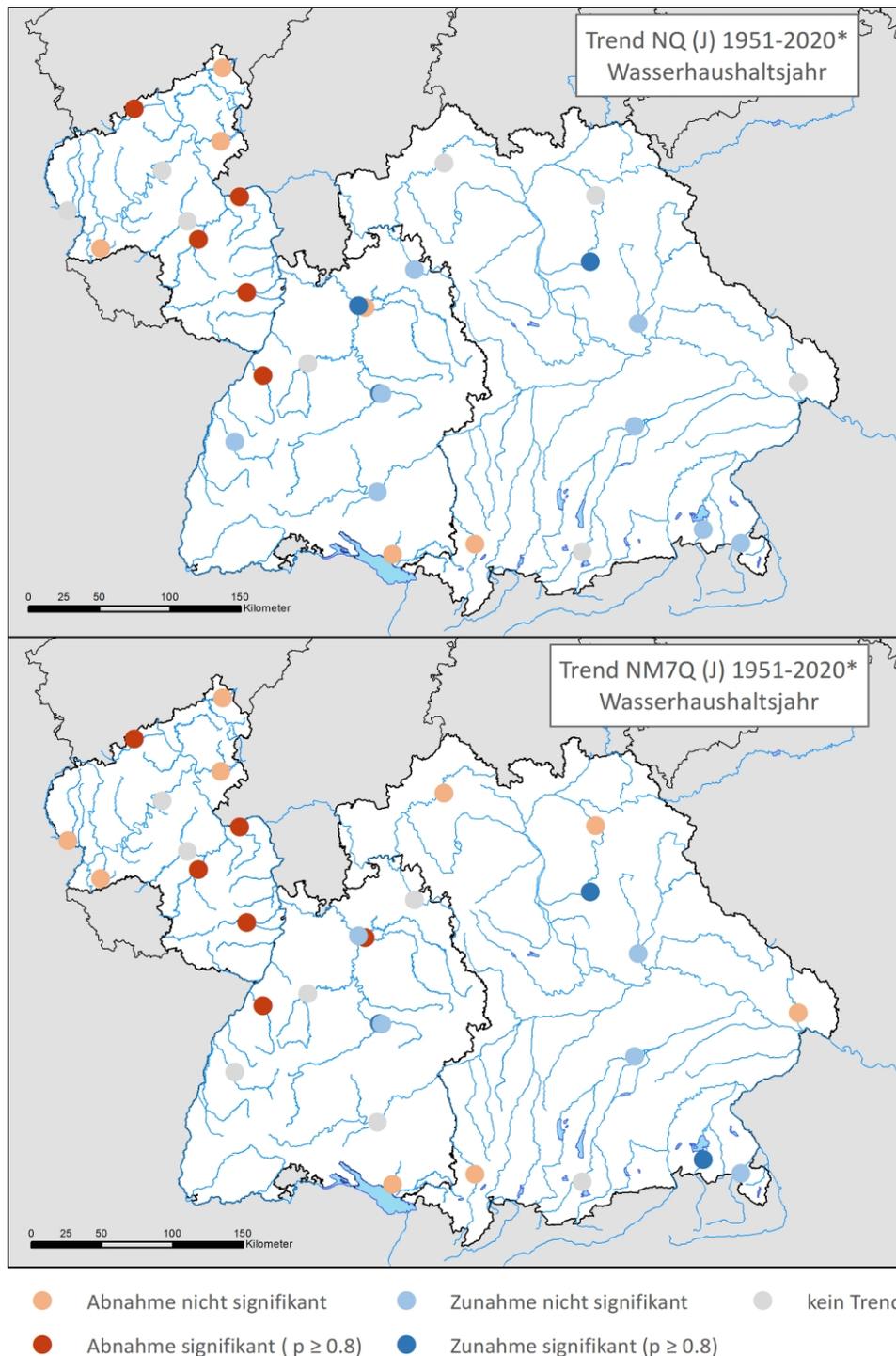
Zudem kommt erschwerend hinzu, dass die Messungen an manchen Messstellen selbst Unsicherheiten aufweisen können, da viele Messstellen nicht explizit für Niedrigwasser ausgelegt sind. Dies bedeutet, dass die Messunsicherheit bei niedrigen Abflüssen zum Beispiel durch Verkrautung hoch sein kann. Dennoch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

7.1 Bisherige Auswertungen

Das Langzeitverhalten der Niedrigwasserabflüsse wurde in KLIWA erstmals im Monitoringbericht 2011 betrachtet [KLIWA 2011b]. Für das gesamte KLIWA-Gebiet konnten keine eindeutigen Rückschlüsse über das Langzeitverhalten der Niedrigwasserabflüsse gemacht werden. Zunehmende Tendenzen waren im Zeitraum 1951 bis 2010 für die jährlichen Niedrigstwasserabflüsse am häufigsten anzutreffen. Allerdings waren die ermittelten Veränderungen mehrheitlich nicht signifikant. Die maximale Dauer von Niedrigwasserperioden war überwiegend rückläufig; dies deutete auf eine Entspannung der Niedrigwassersituation in den vorangegangenen Jahren hin. Allerdings waren diese ermittelten Tendenzen größtenteils ebenfalls nicht signifikant.

7.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung

Exemplarisch werden Niedrigwasserabflüsse an 30 Pegeln (10 je Bundesland) für die Zeiträume 1951 bis 2020 untersucht und mit den Zeiträumen der vorangegangenen Monitoringberichte verglichen. Die betrachteten Pegel aus Rheinland-Pfalz weisen mit einem Datenbeginn in den 1970er Jahren verkürzte Zeitreihen auf, sodass für diese Pegel die Untersuchungen erst 1971 beginnen. Gegenüber den vorherigen Monitoringberichten können Abweichungen in den Daten auftreten, da eine aktualisierte Datengrundlage durch die Landesämter bereitgestellt wurde. Betrachtet werden der jährliche Niedrigstwasserabfluss $NQ(J)$ sowie das jährlich niedrigste arithmetische Mittel des Abflusses an sieben aufeinanderfolgenden Tagen $NM7Q(J)$. Die Verteilung der 30 Pegel über die Bundesländer ist in Abb. 23 dargestellt.



*Pegel in Rheinland-Pfalz zeigen den Trend von 1971-2020

Abb. 23: Lage der betrachteten 30 Pegel für die Untersuchungen zum Trendverhalten der Niedrigwasserabflüsse für je 10 Pegeln in Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz sowie die räumliche Verteilung der Trends.

Für die statistische Betrachtung des Langzeitverhaltens der jährlichen Niedrigstwerte NQ(J) und NM7Q(J) eines Pegels wurden Niedrigstwerte aus Tagesmittelwerten zu Jahresserien für das hydrologische Jahr zusammengefasst.



Ein Trend wird dabei als signifikant bezeichnet, wenn das Signifikanzniveau $\alpha \geq 80\%$ ist. Im Vergleich zu den vorangegangenen Monitoringberichten, wird neben den beiden Kategorien signifikant / nicht signifikant, auch das generelle Vorliegen eines Trends ausgewiesen. Eine Änderung des Abflussverhaltens wird als Trend bezeichnet, wenn die Änderung mindestens 5 % vom Mittelwert beträgt. Geringfügigere Änderungen werden nicht mehr als Trend klassifiziert.

Für die Jahreseinteilung der Abflusszeitreihe wurde größtenteils der Zeitraum Juni bis Mai des Folgejahres bestimmt. Auf eine Einteilung in hydrologische Jahre analog der Hochwasserabflüsse, wurde bewusst verzichtet. Diese hätte dazu geführt, dass die für pluviale Regime typische Niedrigwassersaison, der Herbst, zweigeteilt worden wäre. Zusätzlich wurde der mittlere Jahresgang der monatlichen Niedrigstwerte der Abflüsse betrachtet. Um 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.

7.3 Neue Ergebnisse

Die Ergebnisse der Trenduntersuchungen werden in Abb. 24 und Abb. 25 für alle 30 Pegel zusammengefasst.

Insgesamt ist für den aktuellen Auswertungszeitraum bis 2020 das NQ(J) sehr ausgeglichen (vgl. Abb. 24). Jeweils 11 Pegel weisen eine Zu- oder Abnahme auf. Bei 8 Pegeln konnte kein Trend festgestellt werden. Bei den positiven Trends sind 3 Zunahmen signifikant, bei den Abnahmen sind es 5 Pegel. Die einzelnen Bundesländer weisen dabei Unterschiede im Trendverhalten auf. Während in Baden-Württemberg und Bayern an 6 bzw. 5 Pegeln zunehmende Niedrigwasserabflüsse vorhanden sind, liegen in Rheinland-Pfalz keine Zunahmen vor. Die Mehrzahl der Pegel in Rheinland-Pfalz (7 Pegel) tendiert stattdessen zu einer Abnahme im Niedrigwasserbereich. Bei Betrachtung der Trendänderungen von NQ(J) für die dargestellten Zeiträume wird deutlich, dass die Anzahl an positiven Trends abnimmt, nachdem bei der Zeitreihenbetrachtung bis 2015 ein Maximum erreicht wurde. Die Anzahl der negativen Trends nimmt im Vergleich zum Zeitraum bis 2015 hingegen leicht zu. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Verlängerung der Zeitreihe bis 2020 einen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis hat. Bis ins Jahr 2015 überstiegen die Zunahmen die Abnahmen. Zudem waren diese Zunahmen mehrheitlich signifikant. Aufgrund der geringen Anzahl an betrachteten Pegeln, sind die Ergebnisse jedoch mit Vorsicht hinsichtlich verallgemeinernden Aussagen zu interpretieren.

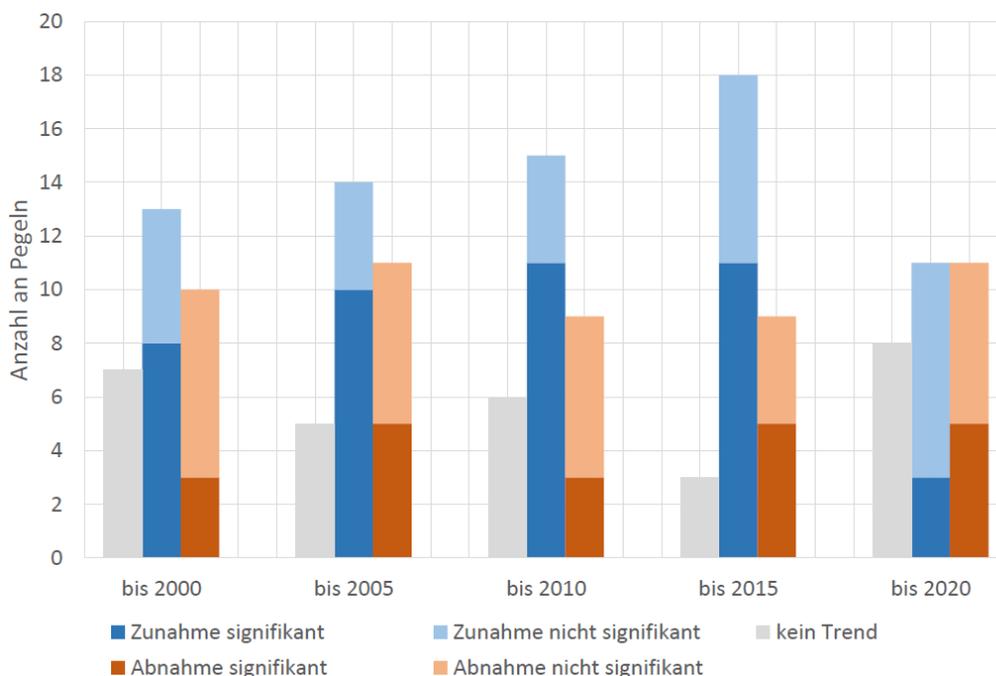


Abb. 24: Überblick über das Trendverhalten der jährlichen Niedrigwasserabflüsse ab 1951 an den 30 Pegel in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz im Vergleich der Zeiträume (die Auswertung der rheinland-pfälzischen Pegel beginnt erst 1971).

Für NM7Q(J) liegt für die Mehrheit der Pegel ein abnehmender Trend vor (15 Pegel) (vgl. Abb. 25). 8 Pegel weisen eine Zunahme auf und bei 7 Pegeln kann kein Trend festgestellt werden. Für den NM7Q sind die Unterschiede zwischen den Bundesländern geringer ausgeprägt. In Baden-Württemberg weist die Mehrzahl an Pegeln kein Trend auf. In Bayern weist eine geringe Mehrheit an Pegeln positive Trends auf. In Rheinland-Pfalz dominieren die negativen Trends, welche mehrheitlich jedoch nicht signifikant sind. Im Vergleich der Zeiträume ergibt sich ein ähnliches Bild, wie beim NQ(J). Bis einschließlich 2015 nahmen die positiven Trends insgesamt zu. Im aktuellen Zeitraum übersteigen die Abnahmen jedoch deutlich die Zunahmen. Auch hier sind die Ergebnisse auf Grund der geringen Anzahl an betrachteten Pegeln jedoch mit Vorsicht zu interpretieren.

Werden die Zeitreihen von 1951 auf 1974 verkürzt, so wird die abnehmende Tendenz der Niedrigstabflusswerte NQ(J) und NM7Q(J) noch deutlicher.

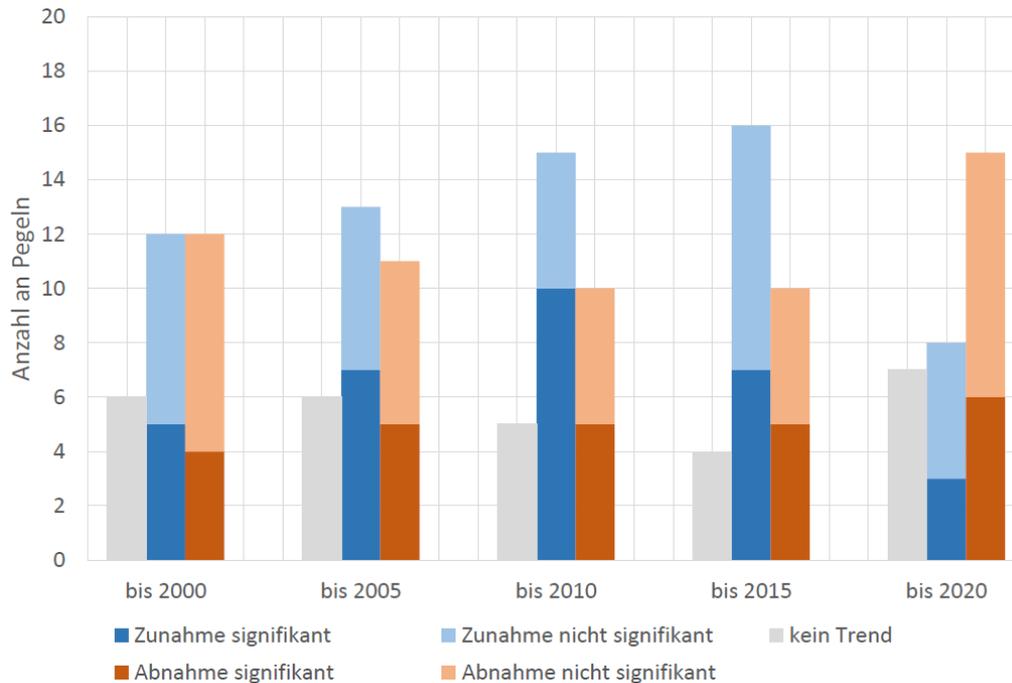


Abb. 25: Überblick über das Trendverhalten des NM7Q ab 1951 an den 30 Pegel in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz im Vergleich der Zeiträume (die Auswertung der rheinland-pfälzischen Pegel beginnt erst 1971).

Die Ergebnisse der Trendberechnung sind beispielhaft für NQ(J) und NM7Q(J) für die Pegel Kalteneck, Stein und Odenbach in den Abb. 26 bis Abb. 28 dargestellt. Die Zeitreihen verdeutlichen, dass über den gesamten Zeitraum vergleichbare Niedrigwasserereignisse aufgetreten sind. Klar zu erkennen sind zum Beispiel die Trockenperioden Anfang der 90er Jahre, das Jahr 2003 sowie die Trockenjahre 2015 und 2018. Bei der Betrachtung der Zeitreihe ist zu beachten, dass auf Grund des Auswertezitraums Juni bis Mai, die Niedrigwasserereignisse kalendarisch um ein Jahr verschoben sind. So findet sich das Minimum des Sommers 2018 im Wasserhaushaltsjahr 2019 wieder.

Die Entwicklung der Jahreswerte wird durch die Auswertung des Jahresganges der monatlichen mittleren Niedrigstabflusswerte unterstützt. Analog dem Vorgehen bei den Hochwasserabflüssen wurde der Jahresgang bezogen auf die einzelnen Monate betrachtet und die Zeitreihe im Jahre 1974 geteilt, wie in Abb. 29 beispielhaft dargestellt. Im Sommerhalbjahr, welches für Niedrigwasser in der Regel das maßgebliche Halbjahr ist, sind die Abflüsse nach 1974 geringer als im Zeitraum bis 1973. Hingegen übersteigen die Abflüsse im Winterhalbjahr nach 1974 die Abflüsse im Vergleich zum vorherigen Zeitraum.

Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass die durchgeführten Auswertungen an 30 Pegeln keine eindeutigen Rückschlüsse auf das gesamte KLIWA-Gebiet über das Langzeitverhalten der Niedrigwasserabflüsse erlauben. Für NQ(J) zeigt sich eine ausgeglichene Verteilung von zunehmenden und abnehmenden Trends. Für NM7Q(J) ist eine Mehrheit von abnehmenden Trends für den Zeitraum 1951 bis 2020 und damit insgesamt eine Trendumkehr im Vergleich zum Monitoringbericht 2016 [KLIWA 2016] zu erkennen.

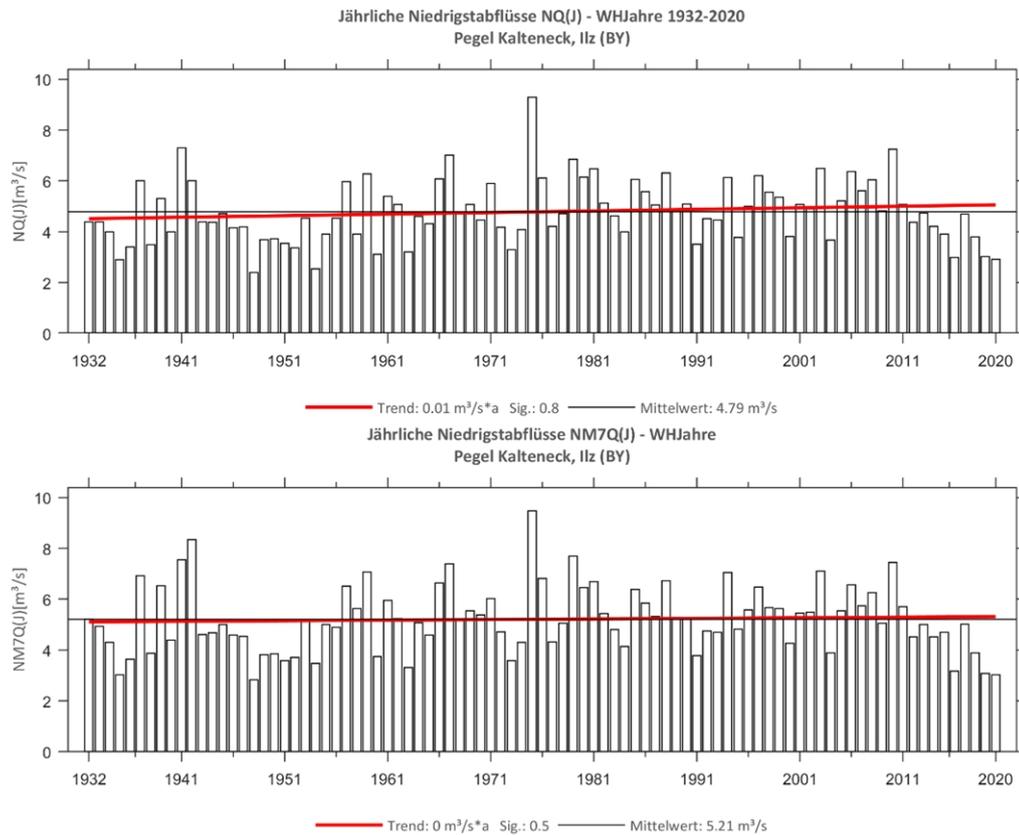


Abb. 26: Ergebnisse der Trenduntersuchung von jährlichen Niedrigwasserabflüssen am Beispiel des Pegels Kalteneck für den Zeitraum 1951–2020.

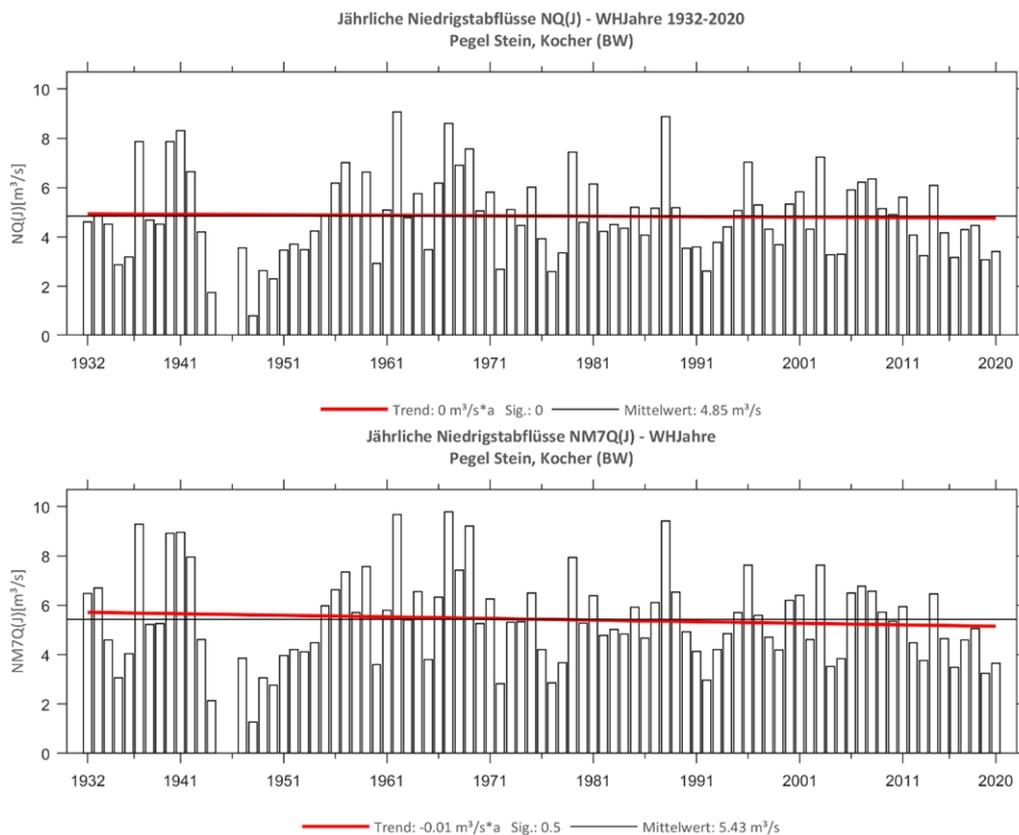


Abb. 27: Ergebnisse der Trenduntersuchung von jährlichen Niedrigwasserabflüssen am Beispiel des Pegels Stein für den Zeitraum 1951–2020.

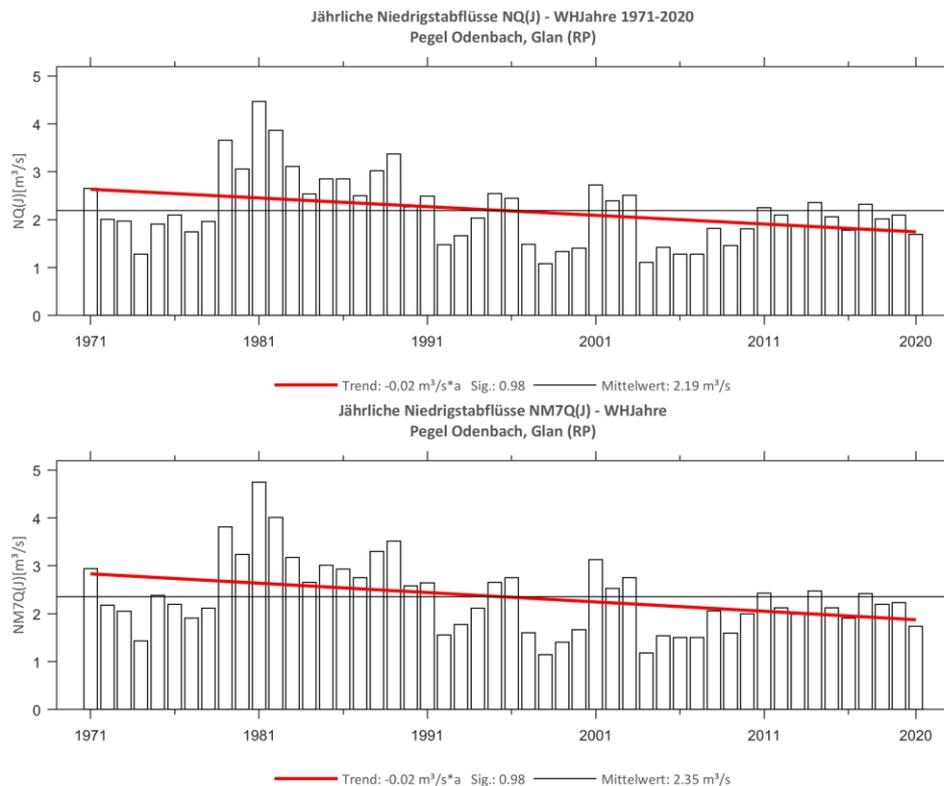


Abb. 28: Ergebnisse der Trenduntersuchung von jährlichen Niedrigwasserabflüssen am Beispiel des Pegels Odenbach für den Zeitraum 1971–2020.

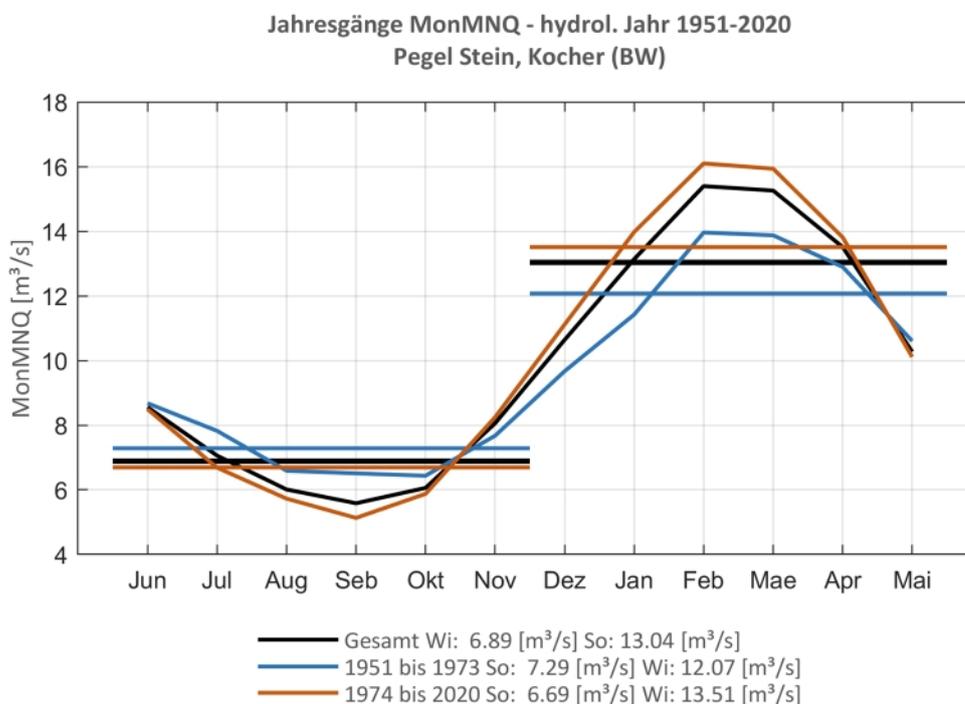


Abb. 29: Jahresgänge des mittleren monatlichen Niedrigwasserabflusses und Halbjahresmittel am Beispiel des Pegels Stein/Kocher für die gesamte Zeitreihe und die beiden Teilzeitreihen 1951–1973 und 1974–2020.



8 Mittlere Abflüsse

8.1 Bisherige Auswertungen

Im Jahr 2003 wurde im Rahmen von KLIWA erstmals 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 ermitteln [KLIWA 2003]. Eine flächendeckende, signifikante Veränderung der mittleren jährlichen Abflüsse (MQ(J)) war dabei nicht nachweisbar. Bei einer zeitlich eingegengten Betrachtung auf die vorangegangenen 30 bis 40 Jahre, also die Zeitspanne, in der eine gewisse Veränderung der klimatischen Verhältnisse festgestellt wurde, wurde jedoch eine Tendenz zu einer Zunahme der mittleren jährlichen und monatlichen Abflüsse in verschiedenen Gebieten festgestellt. Daher wurde die Untersuchung des Langzeitverhaltens der mittleren Abflüsse im KLIWA-Monitoringbericht 2016 [KLIWA 2016] eingeführt und wird im aktuellen Bericht weiter fortgeschrieben.

8.2 Datenbasis und Darstellung der Neuauswertung

Im vorliegenden Bericht werden die Zeitreihen ab 1932 für Bayern und Baden-Württemberg bzw. ab 1971 für Rheinland-Pfalz bis 2020 betrachtet, ausgewertet und mit den Zeiträumen bis 2000, 2005, 2010 und 2015 verglichen. Als repräsentative Datengrundlage dienen die bei der Untersuchung der Hochwasserabflüsse ebenfalls betrachteten 116 Pegel (vgl. Abb. 30). Die untersuchten Pegel aus Rheinland-Pfalz weisen mit einem späteren Datenbeginn verkürzte Zeitreihen auf. Dies ist der Grund weshalb die Datenauswertung für Rheinland-Pfalz im Jahr 1971 beginnt.

Für die statistische Betrachtung des Langzeitverhaltens der jährlichen und halbjährlichen Abflusswerte (MQ(J) bzw. MQ(Wi) und MQ(So)) eines Pegels wurden die vorhandenen täglichen Abflüsse zu Jahresserien für das hydrologische Jahr (November bis Oktober), sowie das hydrologische 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 Zeitreihen wurde anschließend jeweils die langjährige Veränderung in Form von linearen Trends und deren statistische Signifikanzen ermittelt.

Ein Trend wird dabei als signifikant bezeichnet, wenn das Signifikanzniveau $\alpha \geq 80\%$ ist. Im Vergleich zu den vorangegangenen Monitoringberichten, wird neben den beiden Kategorien signifikant / nicht signifikant, auch das generelle Vorliegen eines Trends ausgewiesen. Eine Änderung des Abflussverhaltens wird als Trend bezeichnet, wenn die Änderung mindestens 5 % vom Mittelwert beträgt. Geringfügigere Änderungen werden nicht mehr als Trend klassifiziert.

Zusätzlich wurde der mittlere Jahresgang der mittleren Monatswerte MoMQ 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 (vgl. Abb. 37 bis Abb. 39).

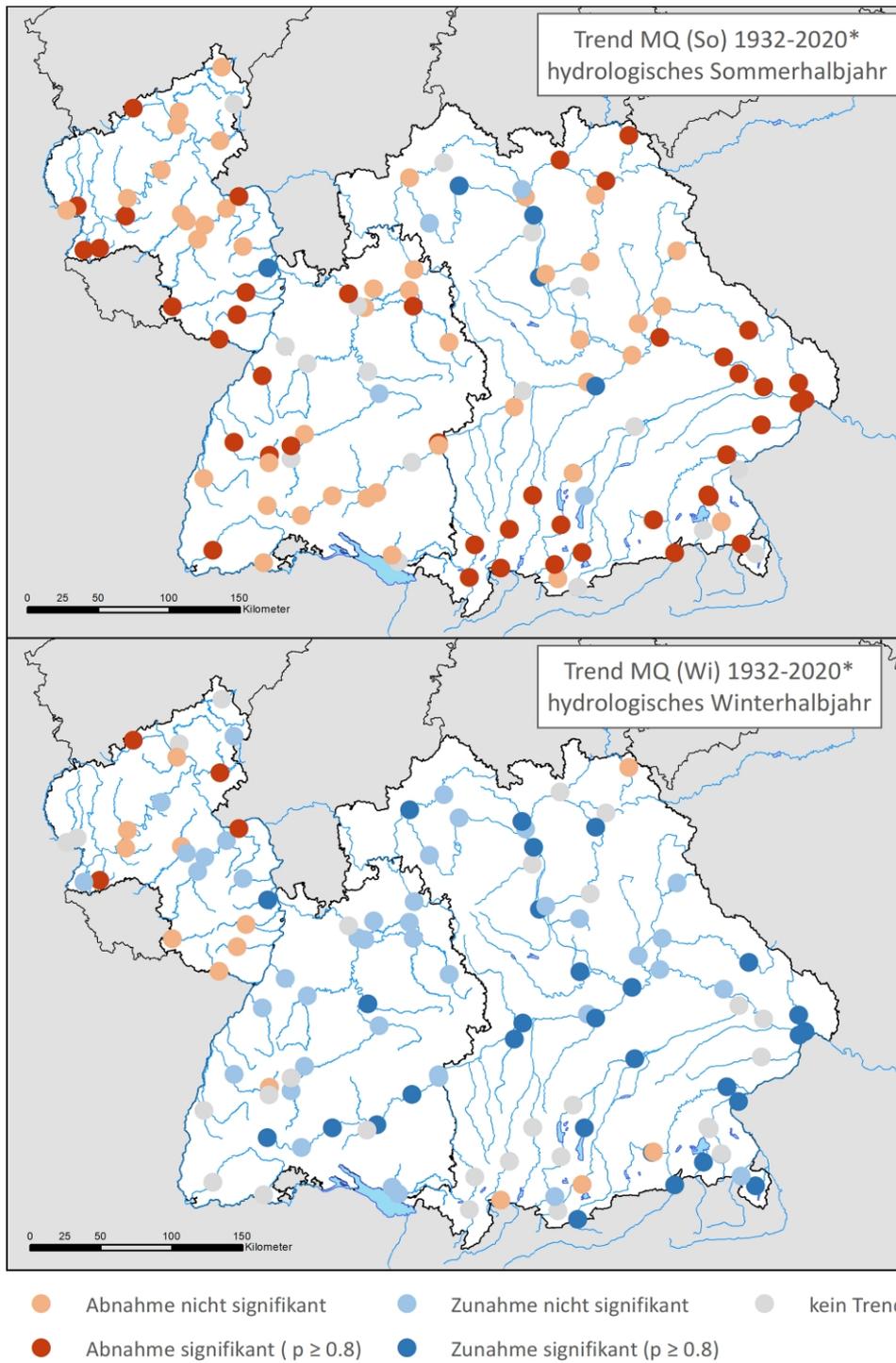


Abb. 30: Lage der betrachteten 116 Pegel für die Untersuchungen zum Trendverhalten der Mittleren Abflüsse in Bayern (61), Baden-Württemberg (30) und Rheinland-Pfalz (25) sowie die räumliche Verteilung der Trends.

8.3 Neue Ergebnisse

Die räumliche Darstellung der Trends in Abb. 30 zeigt deutlich, dass der mittlere Abfluss fast im gesamten Untersuchungsgebiet im Winterhalbjahr seit 1932 bzw. 1971 bis 2020 zugenommen, während er im hydrologischen Sommerhalbjahr abgenommen hat. Die Ergebnisse der Trenduntersuchungen für das Gesamtjahr sind für alle 116 Pegel in den Abb. 31 bis Abb. 33 zusammengefasst. In den Abb. 34 bis Abb. 36 sind beispielhaft die Ergebnisse der Trenduntersuchung der Zeitreihe ab Beobachtungsbeginn bis 2020 für die Pegel Donauwörth an der Donau, Bad Rotenfels an der Murg und Martinstein 2 an der Nahe dargestellt.

Die Trendanalyse der mittleren Abflüsse von 1932 bzw. 1971 bis 2020 zeigt für die 116 Pegel im **Gesamtjahr** (vgl. Abb. 31) einen nahezu ausgeglichenen Trend: 37 Pegel (32 %) zeigen einen zunehmenden, 40 Pegel (34 %) einen abnehmenden Trend und 39 Pegel (34 %) weisen keinen Trend auf. Dabei ist die Mehrheit der positiven Trends nicht signifikant. Bei den negativen Trends sind 15 Pegel (38 %) signifikant. Dieses Verhalten setzt sich beim Vergleich der Bundesländer jedoch nicht fort: In Baden-Württemberg überwiegt der Anteil an positiven Trends mit 50 % (15 Pegel). In Bayern weist hingegen die Mehrzahl an Pegeln mit 43 % (26 Pegel) keinen Trend auf und in Rheinland-Pfalz liegen überwiegend negative Trends vor (5 % bzw. 14 Pegel). Bei einem Vergleich der Untersuchungsergebnisse für die Zeiträume 1932 bzw. 1971 bis 2000, 2005, 2010, 2015 und 2020 zeigt sich für das Gesamtjahr bei einer Zeitreihenlänge bis 2020 insgesamt eine Trendumkehr: Waren bis 2015 noch mehrheitlich zunehmende Trends zu verzeichnen, so überwiegen beim Zeitraum bis 2020 geringfügig die Anzahl an negativen Trends.

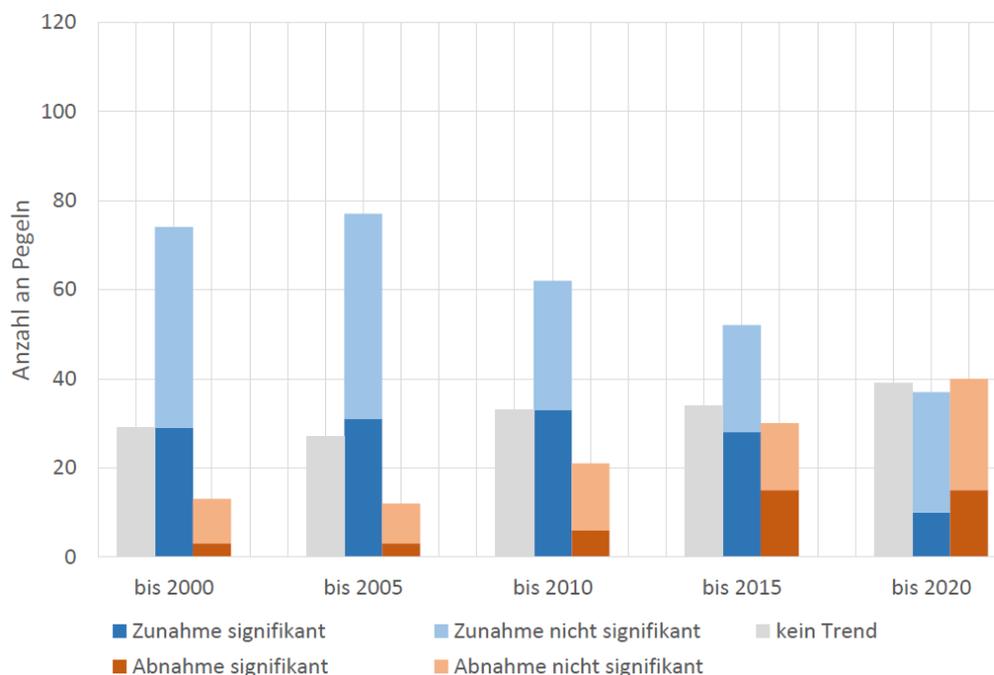


Abb. 31: Überblick über das Trendverhalten der mittleren Abflüsse ab 1932 über das hydrologische Jahr an den 116 Pegel in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz im Vergleich der Zeiträume (die Auswertung der rheinland-pfälzischen Pegel beginnt erst 1971).

Das hydrologische **Winterhalbjahr** (vgl. Abb. 32) zeigt mit zunehmenden Trends an 71 Pegel (61 %) eine deutliche Tendenz zu steigenden mittleren Abflüssen, mit signifikant zunehmenden Trends an 30 Pegeln (42 %). Für die beiden Bundesländer Bayern und Baden-Württemberg ergeben sich bei den Kennwerten des mittleren Abflusses insgesamt vergleichbare Tendenzen. Im Winterhalbjahr zeigt der größte Anteil der Pegel steigende Tendenzen auf (40 Pegel (66 %) in



Bayern, 22 Pegel (73 %) in Baden-Württemberg). Im Gegensatz hierzu zeigen die mittleren Abflüsse des Winterhalbjahres in Rheinland-Pfalz eine Mehrheit an Pegeln mit negativen Trends. Beim Vergleich der unterschiedlich langen Beobachtungszeitreihen nimmt die Anzahl an signifikant positiven Trends analog zur Betrachtung des Gesamtjahres deutlich ab. Jedoch dominieren im Winterhalbjahr weiterhin die zunehmenden Trends.

Das hydrologische **Sommerhalbjahr** (vgl. Abb. 33) weist ein gegenteiliges Trendverhalten im Vergleich zum Winterhalbjahr auf, hier sind 88 Pegel (76 %) abnehmend, von diesen weisen die Hälfte eine signifikante Abnahme auf. Beim Vergleich der Bundesländer stellt sich ein einheitliches Bild dar. Abnahmen überwiegen deutlich, gefolgt von den Pegeln an denen kein Trend feststellbar ist. An wenigen Pegeln wird eine Zunahme berechnet. In Rheinland-Pfalz weisen über 90 % der Pegel eine fallende Tendenz auf. Im Hinblick auf die Betrachtung der unterschiedlichen Zeiträume verfestigt sich das Bild, dass immer mehr Pegel einen negativen Trend zeigen.

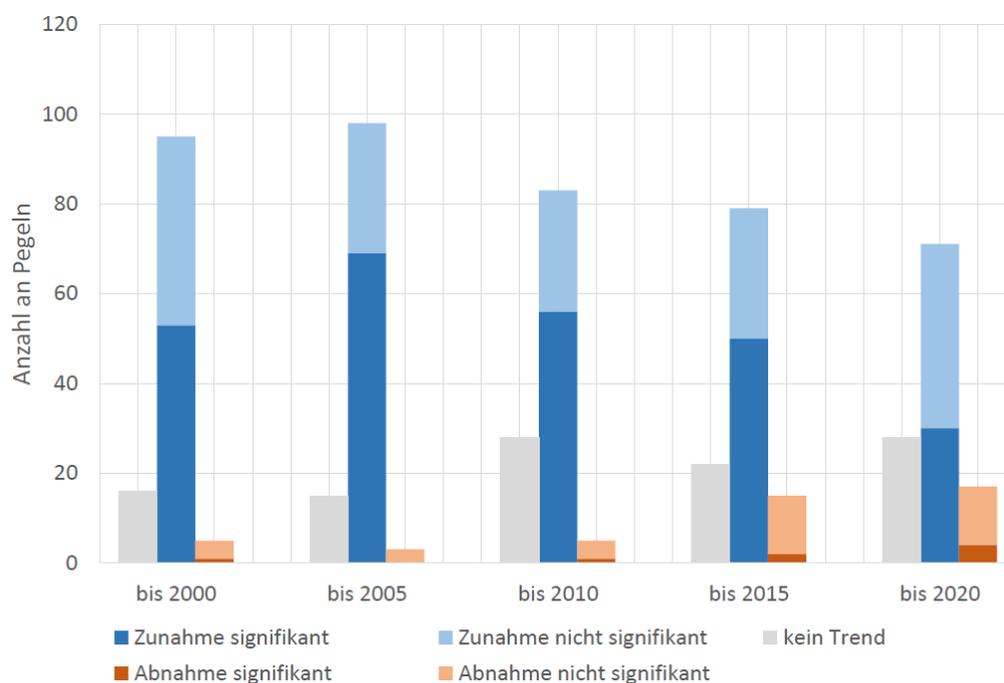


Abb. 32: Überblick über das Trendverhalten der mittleren Abflüsse ab 1932 über das hydrologische Winterhalbjahr an den 116 Pegel in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz im Vergleich der Zeiträume (die Auswertung der rheinland-pfälzischen Pegel beginnt).

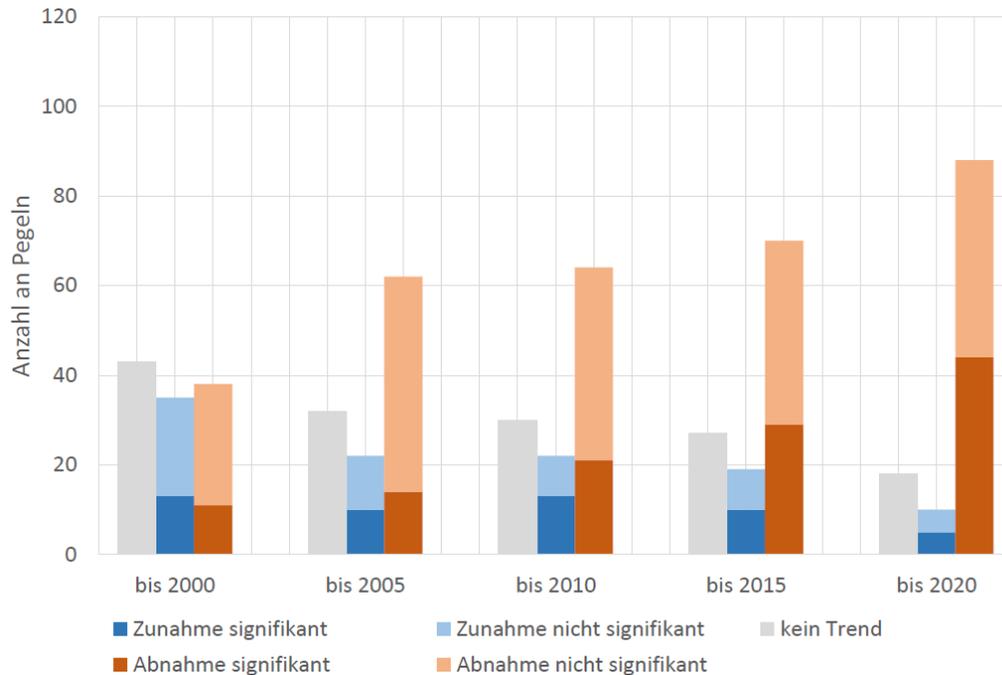


Abb. 33: Überblick über das Trendverhalten der mittleren Abflüsse ab 1932 über das hydrologische Sommerhalbjahr an den 116 Pegel in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz im Vergleich der Zeiträume (die Auswertung der rheinland-pfälzischen Pegel beginnt erst 1971).

Diese Zunahme wird durch eine Erhöhung des mittleren Abflusses im hydrologischen Winterhalbjahr hervorgerufen (Donauwörth: +15 % / Bad Rotenfels: +11 % / Martinstein 2: +22 %), während im Sommerhalbjahr Abnahmen (Donauwörth: -4 % / Rotenfels: -35 % / Martinstein 2: -12 %) auftreten bzw. ausgeglichene Verhältnisse vorliegen (vgl. Abb. 34 bis Abb. 36).

Die Entwicklung in den Jahres- und Halbjahreswerten wird durch die Auswertung des **Jahresganges der monatlichen Abflusswerte** (MoMQ) unterstützt. In den Abb. 37 bis Abb. 39 sind exemplarisch für die Pegel Donauwörth, Bad 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 (MoMQ) der Zeitperiode von 1974 bis 2020 liegen bei den exemplarischen Pegeln jeweils deutlich über dem Mittelwert der gesamten Zeitreihe und der früheren Periode bis 1973.

Insgesamt lässt sich aus den Untersuchungen schlussfolgern, dass für den gesamten betrachteten Zeitraum 1932 bzw. 1971 bis 2020 im Gesamtjahr die Trends relativ ausgeglichen sind. Im Winterhalbjahr überwiegen zunehmende mittlere Abflüsse, im Sommerhalbjahr abnehmende mittlere Abflüsse. Im Mittel sind ca. 46 % der Trends signifikant. Durch die Zeitreihenverlängerung bis 2020 geht die Anzahl der Pegel mit vormaligen zunehmenden signifikanten Trends vor allem im Gesamtjahr aber auch im Winterhalbjahr zurück. Im Sommerhalbjahr erhöht sich die Anzahl der Pegel mit signifikant abnehmenden Trends deutlich.

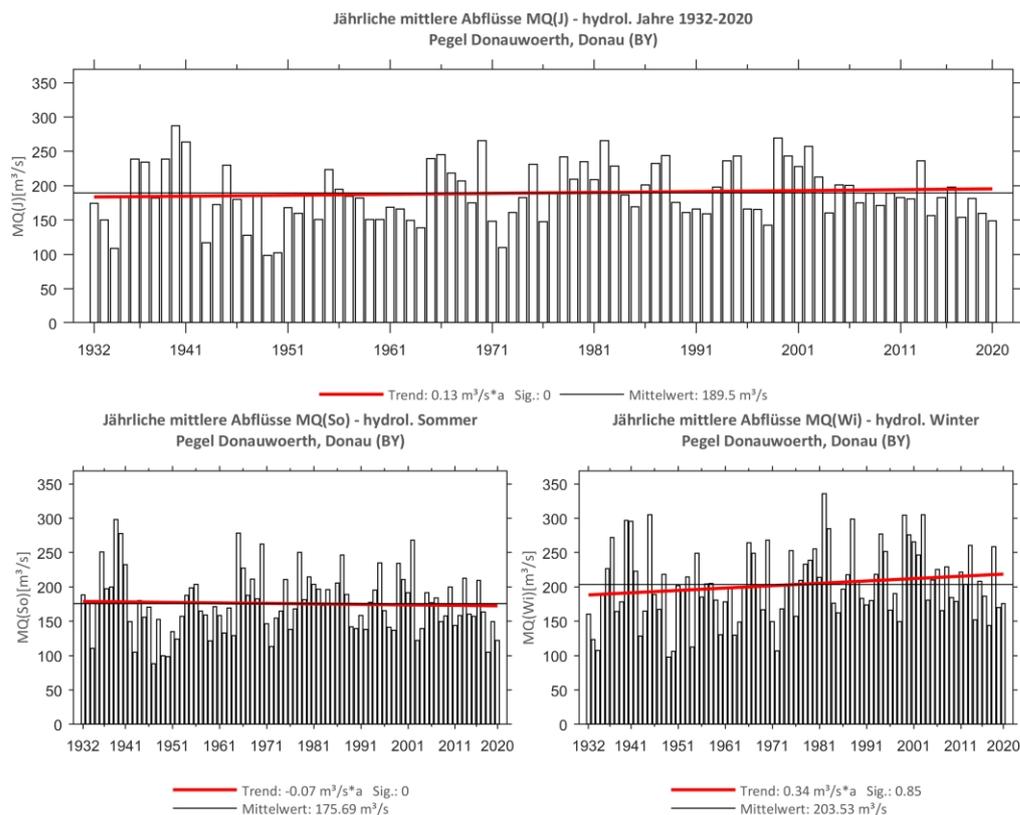


Abb. 34: Ergebnisse der Trenduntersuchung von jährlichen mittleren Abflüssen am Beispiel des Pegels Donauwörth für den Zeitraum 1932–2020.

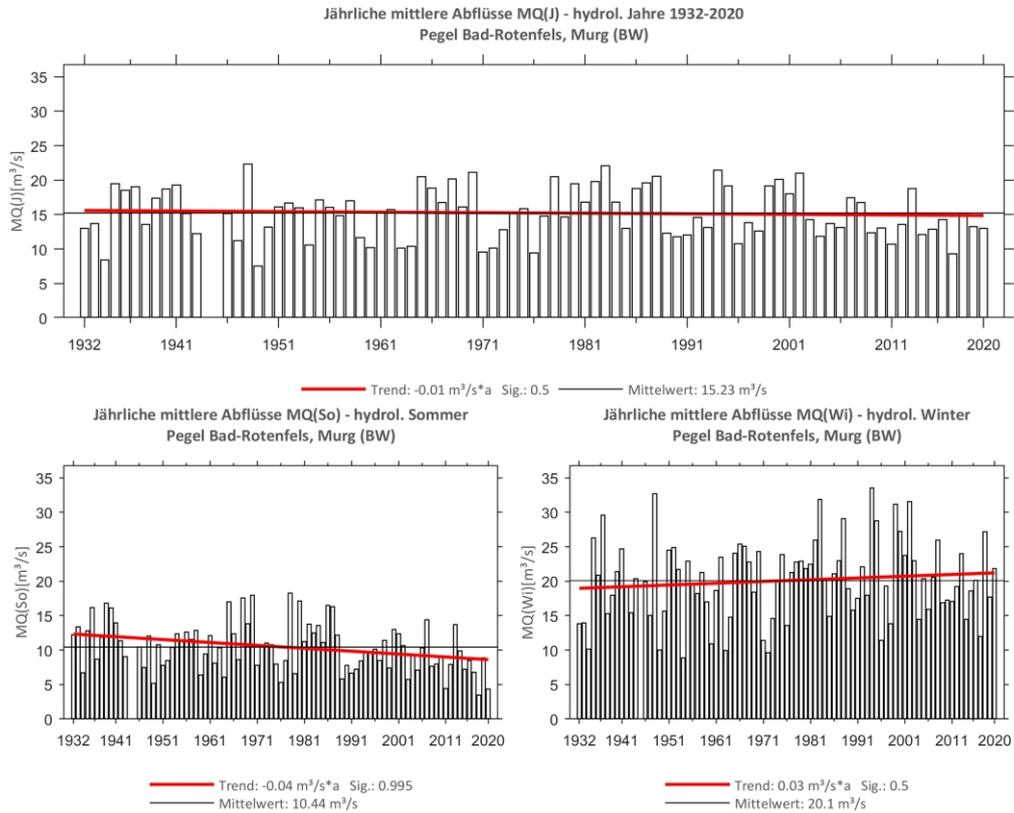


Abb. 35: Ergebnisse der Trenduntersuchung von jährlichen mittleren Abflüssen am Beispiel des Pegels Bad Rotenfels für den Zeitraum 1932–2020.

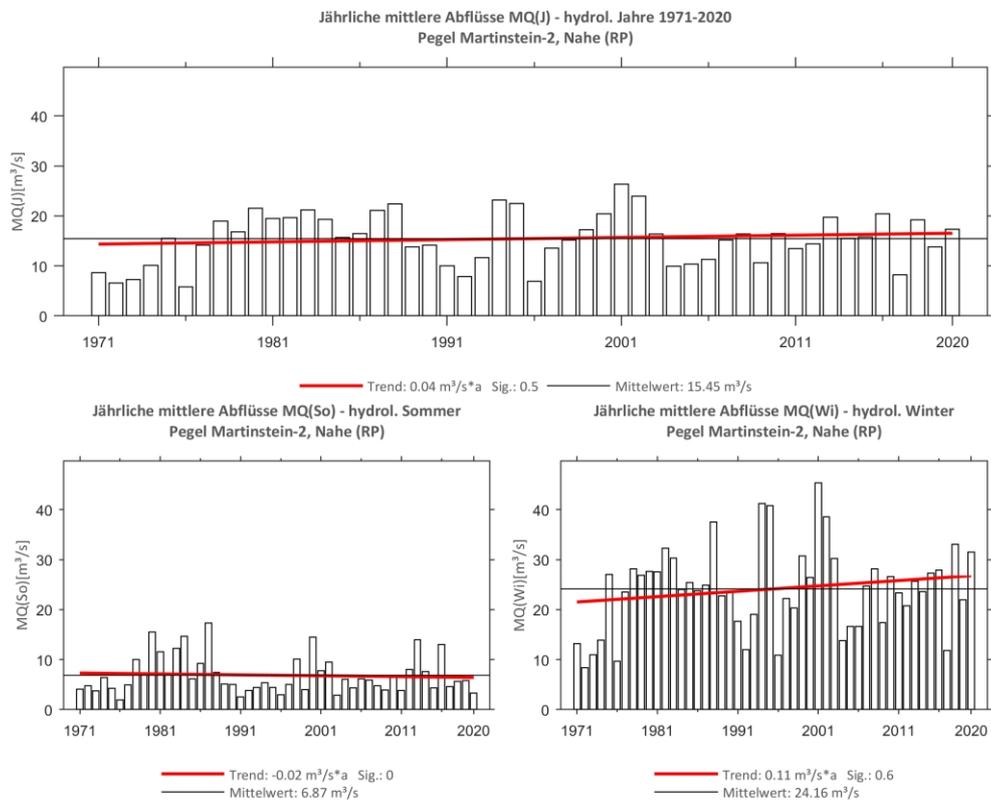


Abb. 36: Ergebnisse der Trenduntersuchung von jährlichen mittleren Abflüssen am Beispiel des Pegels Martinstein 2 für den Zeitraum 1971–2020.

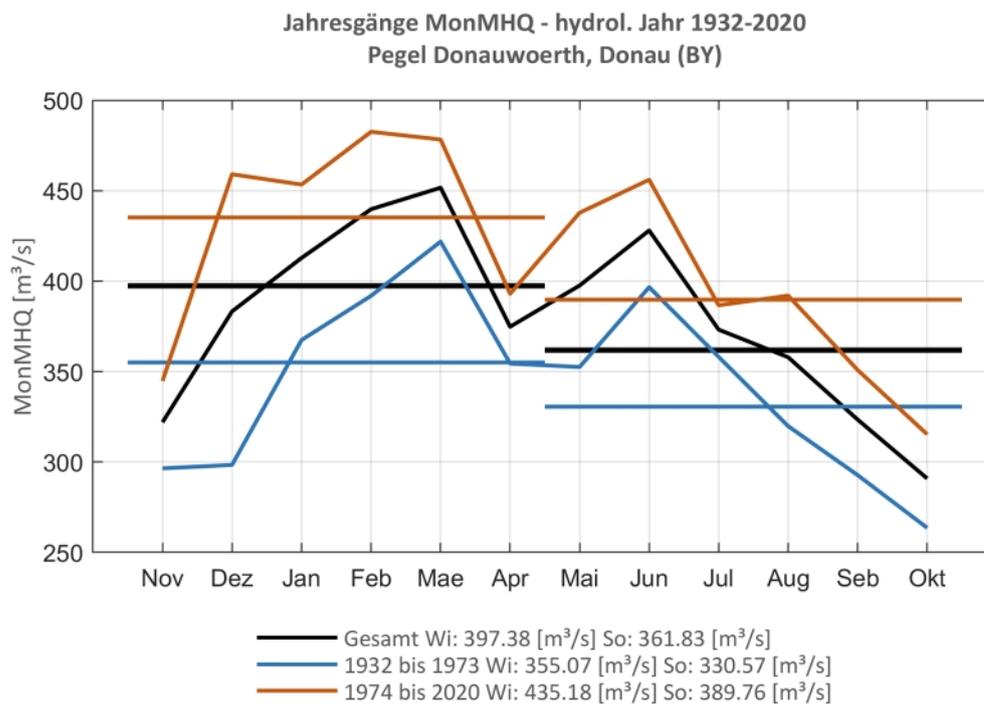


Abb. 37: Jahresgang des monatlichen mittleren Abflusses und der Halbjahresmittel am Beispiel des Pegels Donauwörth für die gesamte Zeitreihe sowie die beiden Teilzeitreihen 1932–1973 und 1974–2020.

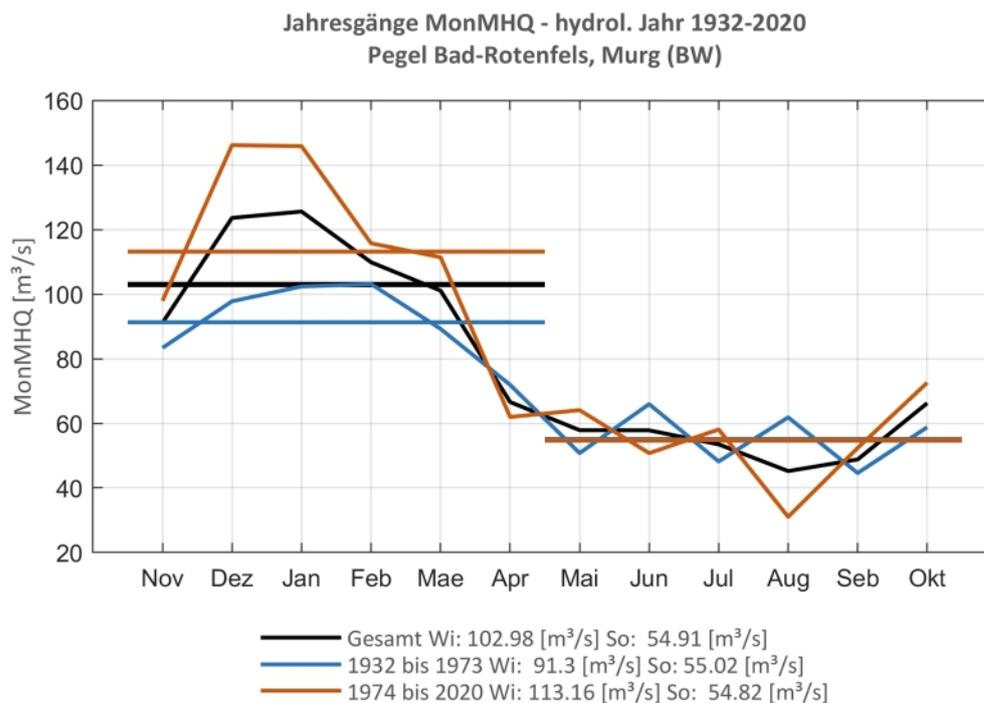


Abb. 38: Jahresgang des monatlichen mittleren Abflusses und der Halbjahresmittel am Beispiel des Pegels Bad Rotenfels für die gesamte Zeitreihe sowie die beiden Teilzeitreihen 1932–1973 und 1974–2020.

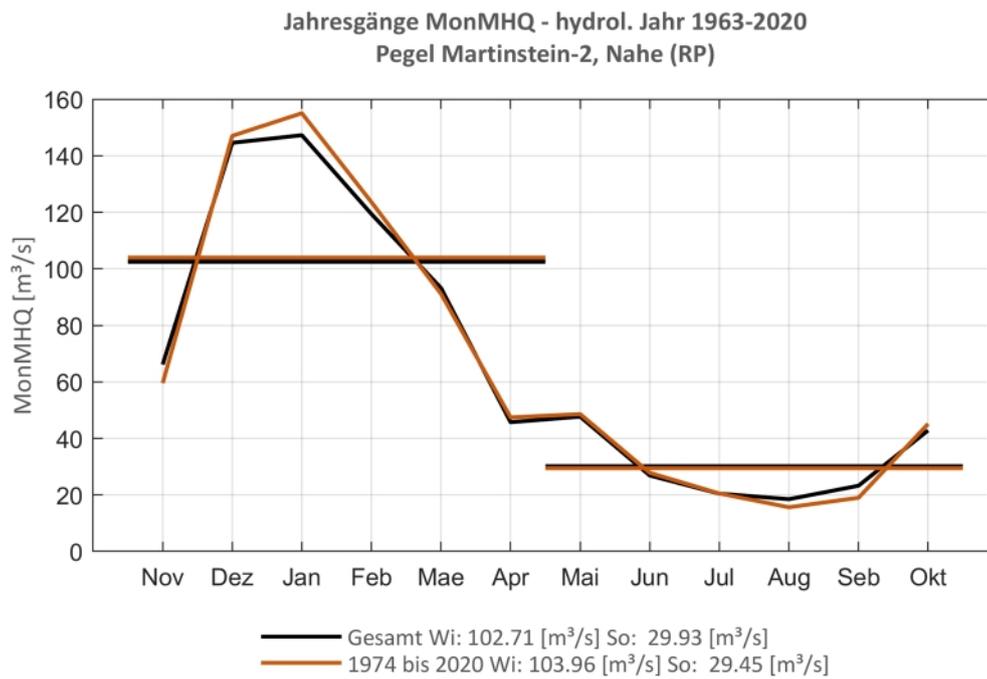


Abb. 39: Jahresgang des monatlichen mittleren Abflusses und der Halbjahresmittel am Beispiel des Pegels Martinstein 2 für die gesamte Zeitreihe sowie die Teilzeitreihe 1974-2020.

9 Grundwasserstände und Quellschüttungen

9.1 Statistische Untersuchung des Langzeitverhaltens

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 2011a]. In den Jahren 2016 und 2021 wurden die Untersuchungen fortgeschrieben. Aktuell liegen Auswertungen mit Daten bis Ende 2020 vor.

Neben den Zeitreihen von Grundwasserstand und Quellschüttung wurden in der Erststudie von 2008 auch Klimakenngrößen in die Auswertung mit einbezogen, um mögliche statistische Zusammenhänge zwischen den hydrologischen und den meteorologischen Zeitreihen aufzudecken. Es zeigte sich, dass die Klimavariablen signifikant mit den Grundwasserständen und Quellschüttungen korrelieren.

Auf Basis der bisherigen Studien ließen sich darüber hinaus nachfolgende Erkenntnisse ableiten: Bei vielen Messstellen traten signifikante Veränderungen hinsichtlich der Saisonalität auf. Das Minimum des Jahresgangs liegt innerhalb der Monate Juli bis September, das Maximum innerhalb der Monate Januar bis März (Abb. 40).

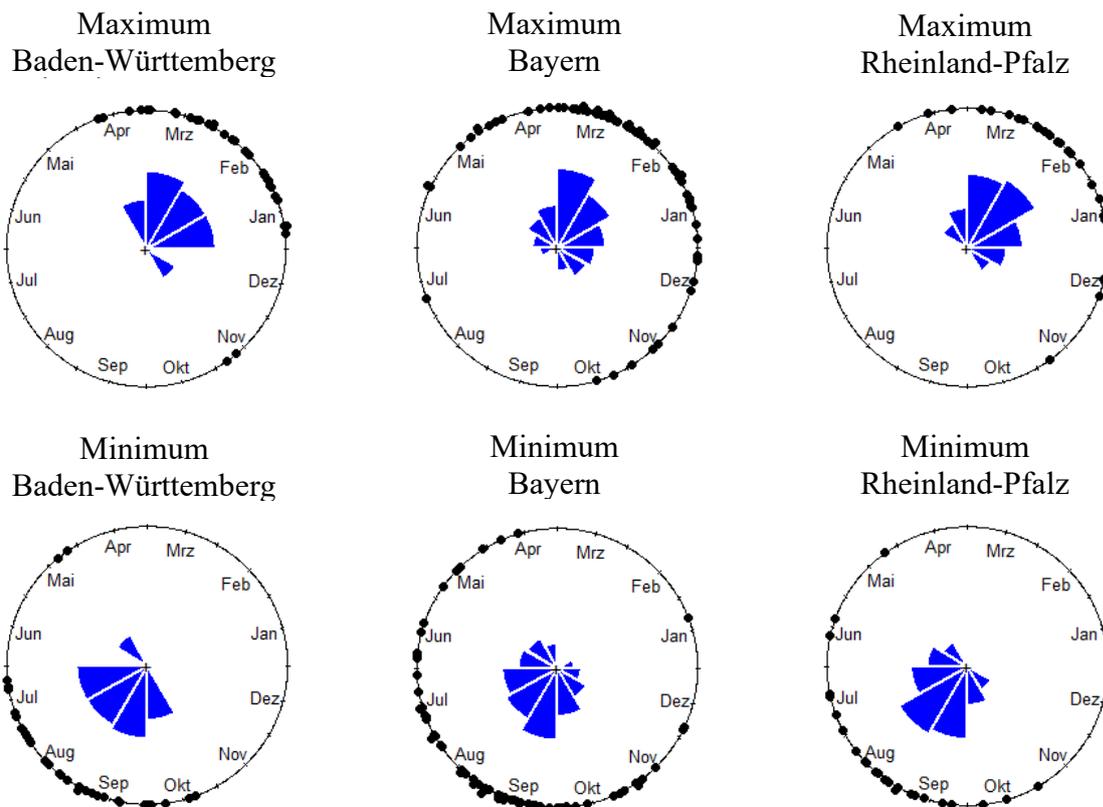


Abb. 40: Auftrittszeitpunkte von Maximum und Minimum im Jahresgang von Quellschüttungen und Grundwasserständen.

Bei knapp der Hälfte der Messstellen (2008: 45 %, 2016: 48 %, 2021: 52 %) ist eine signifikante Tendenz zu einem früheren Auftreten des Maximums, bei gut einem Drittel der Messstellen (2008: 40 %, 2016: 35 %, 2021: 34 %) eine Vergrößerung der Amplitude im Jahresgang festzustellen.

Das Ausmaß der jährlichen Extremwerte weist ebenfalls Veränderungen auf. Die jährlichen Höchststände zeigen bei etwa 29 % eine abnehmende Tendenz. Die Abnahmen der Höchststände betreffen insbesondere die jüngste Vergangenheit. So lag für diese der Anteil der Abnahmen im Jahr 2016 noch bei 16 %. Der überwiegende Anteil der Zeitreihen zeigt jedoch weiterhin keinen Trend. In der Betrachtung der jährlichen Niedrigstwerte liegt der Anteil der Abnahmen mit 49 % der Messstellen dafür deutlich höher.

In den ersten beiden Studien zeigte sich bei zwei Drittel der Messstellen (2008: 67 %, 2016: 68 %) über die jeweilige Gesamtbeobachtungszeit eine langfristige Tendenz zur Verringerung der mittleren Grundwasserstände und Quellschüttungen. Mit der Untersuchung von 2021 konnte diese Entwicklung mit 83 % der Messstellen nun an einem wesentlich höheren Anteil der Messstellen festgestellt werden. Der Rückgang ist hierbei nicht auf bestimmte Regionen beschränkt, sondern lässt sich im gesamten Untersuchungsraum gleichermaßen feststellen. Defizitphasen und -dauern hingegen bleiben weiterhin überwiegend unverändert.

Zusätzlich liegen Daten zum Langzeitverhalten von Bodenwasserhaushaltsparametern und der Grundwasserneubildung als Ergebnis des Bodenwasserhaushaltsmodells GWN-BW flächendeckend für Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz vor [GIT 2013]. Die entsprechenden Auswertungen beginnen 1951 und wurden zwischenzeitlich ebenfalls um den Zeitraum 2011-2015 [GIT 2016] und 2016-2020 aktualisiert sowie um die Länder Hessen und Saarland erweitert.

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. 41 mit Lage der Messstellen), deren Grundwasserstands- oder Quellschüttungsganglinien auf Basis von Monatsmittelwerten für den Zeitraum 1951 bis 2020 in Abb. 42 und Abb. 43 dargestellt sind. Die Ganglinien zeigen die vieljährigen Monatsmittelwerte und die jeweiligen aktuellen Monatsmittelwerte. Als farbcoodierte 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 2021].

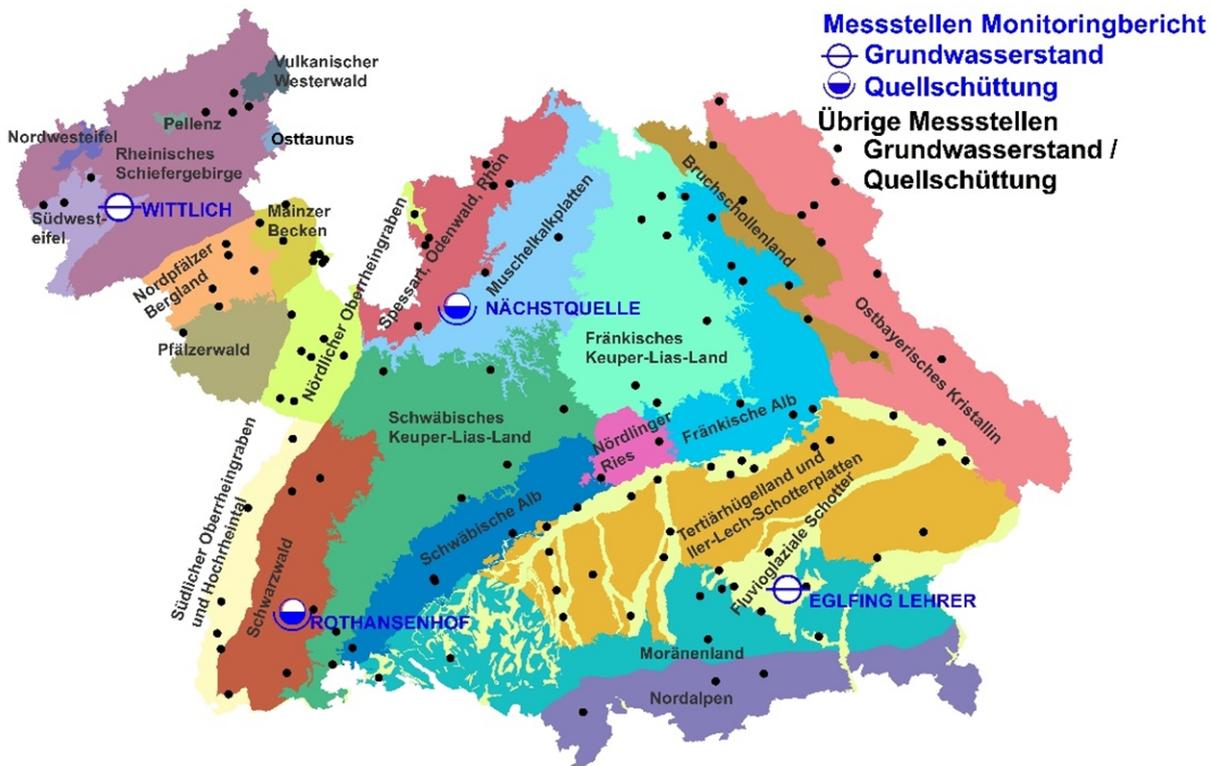


Abb. 41: Übersicht über die 25 hydrogeologischen Einheiten im KLIWA-Gebiet mit Lage der ausgewählten Grundwassermessstellen und Quellen.

9.3 Neue Ergebnisse

Die Ergebnisse an zwei Grundwassermessstellen und zwei Quellschüttungsmessstellen zeigen beispielhaft die Entwicklung der Grundwasserdynamik für den Zeitraum 1951 bis 2020. Wie bereits im vorherigen Monitoringbericht aus dem Jahr 2016 können auch nun wieder Ergebnisse einer Langzeitsimulation des Bodenwasserhaushalts und der Grundwasserneubildung aus Niederschlag als erklärende Variablen für den gesamten Betrachtungszeitraum 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. 42 oben). 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 sowie einem schwach ausgeprägten Jahresgang des Grundwasserstandes (Abb. 42 oben); ähnliches gilt für den kombinierten Poren-/Kluftgrundwasserleiter in der Wittlicher Senke (Abb. 42 unten).

Kluft- und Karstgrundwasserleiter mit geringem Speichervolumen verursachen eine große Schwankungsbreite der Jahresamplitude der Quellschüttungen (Abb. 43). Änderungen von Grundwasserständen und Quellschüttungen unterliegen, neben den typischen jahreszeitlichen Schwankungen, auch einem vieljährigen Wechsel von „Nass“- und „Trockenperioden“.

Aktuelle Monatsmittelwerte der Periode 2016 bis 2020

Die zurückliegende Periode von 2016 bis 2020 zeigt in allen vier Ganglinien im Vergleich zum vieljährigen Monatsmittel vergleichsweise niedrige Grundwasserstände bzw. Quellschüttungen.

Im Bereich der Münchener Schotterebene (Abb. 42 oben) manifestierte sich die im Jahr 2014 begonnene defizitäre Phase. Der Grundwasserstand im Bereich der Messstelle Wittlich (Abb. 42 unten) lag von 2003 bis Ende 2013 noch stets unter dem vieljährigen Mittel. Nach einer kurzzeitigen Erholung schwankten die Messstände seit 2016 wieder in beide Richtungen um den langjährigen Grundwasservorrat. Dabei waren die Defizite stärker ausgeprägt als zwischenzeitliche Grundwasserüberschüsse.

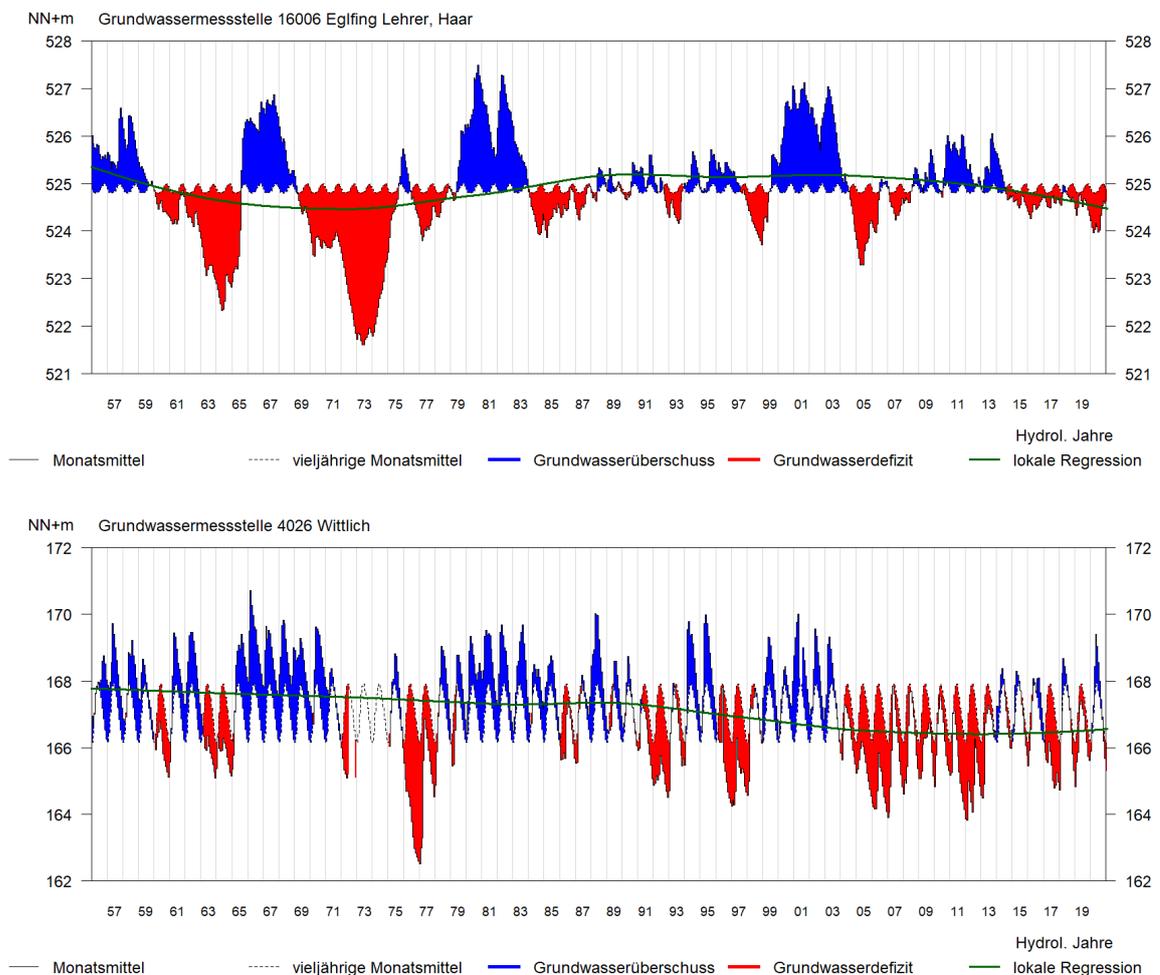


Abb. 42: Exemplarische Grundwasserstandsganglinien: oben: Messstelle Haar (BY, Lockergesteine, Flachland); unten: Messstelle Wittlich (RP, Sandstein, Mittelgebirge).



Die Rothansenhofquelle (Abb. 43 oben) wird aus einem vergleichsweise kleinen Einzugsgebiet ($< 1 \text{ km}^2$) im Kristallin des Südschwarzwalds gespeist. Die Schüttung schwankt üblicherweise 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. Seit dem Jahr 2015 zeigt die Rothansenhofquelle deutlich unterdurchschnittliche Schüttungsmengen. Mit deutlich unter 1 l/s wurden sogar wiederholt die geringsten Schüttungen seit Beobachtungsbeginn gemessen.

Die Nächstquelle (Abb. 43 unten) 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. Die jüngste Periode seit 2015 begann mit einer defizitären Quellschüttung, pendelte sich im weiteren Verlauf jedoch auf mittlerem Niveau ein.

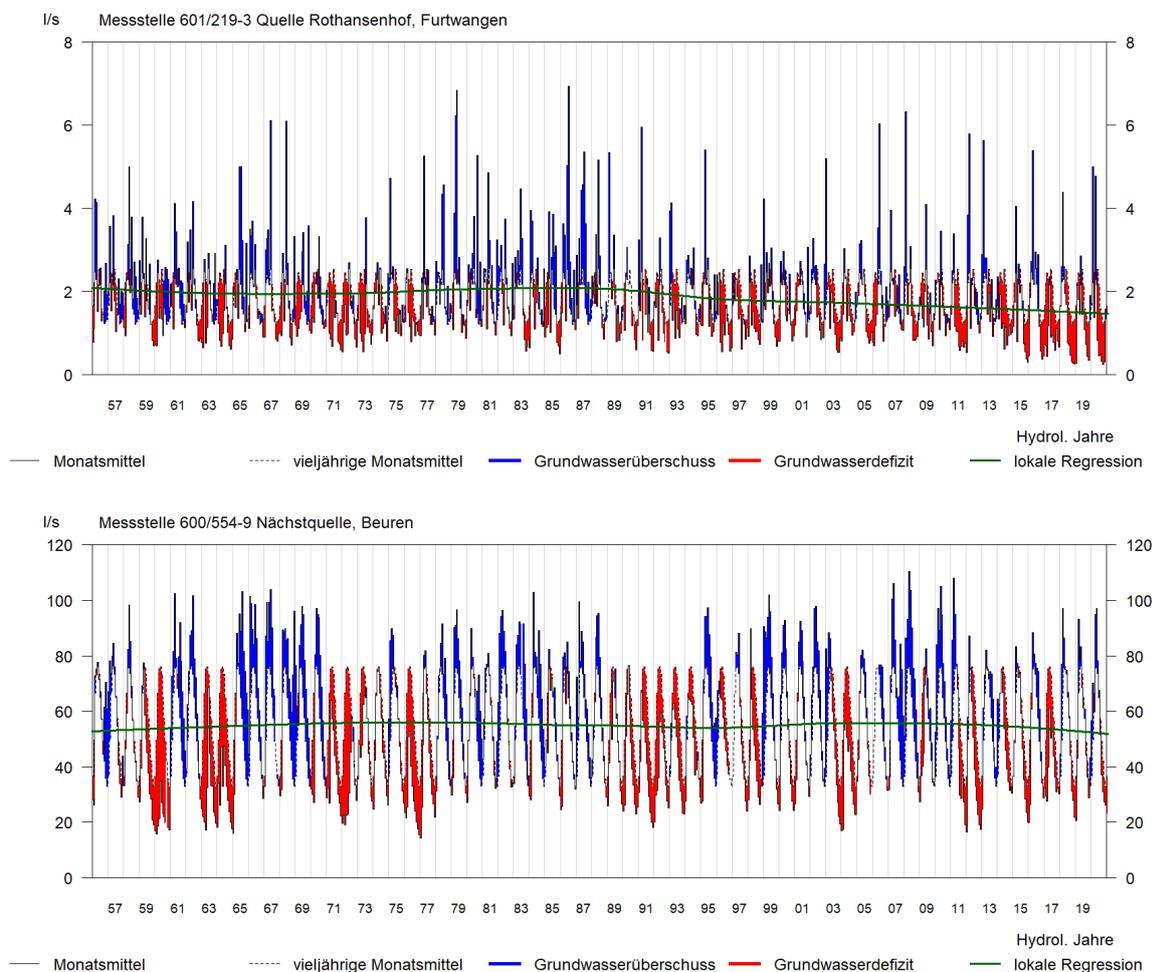


Abb. 43: Exemplarische Quellschüttungsganglinien: oben Quelle Rothansenhof (BW, Kristallin, Mittelgebirge); unten: Nächstquelle (BW, Muschelkalk, Mittelgebirge).

Grundwasser- und Quellschüttungsschwankungen im Zeitraum 1955 bis 2020

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 aufgrund des großen erschlossenen Grundwasserspeichers besonders deutlich an der Messstelle Eglfing Lehrer, Haar (Abb. 42 oben) zur Geltung. Zu beachten sind an dieser Messstelle, 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 vergleichsweise geringe Schwankungsbreiten im Grundwasserstand ab. Während der verhältnismäßig langanhaltenden, aktuellen Trockenperiode seit 2014 ist wieder eine leichte Zunahme der Amplitude zu verzeichnen. Bedingt durch die insgesamt sehr ausgeprägten Niedrig- und Hochwasserperioden weist die Messstelle Eglfing Lehrer überwiegend wechselnde Tendenzen auf. Die lokal gewichtete Regression über den Gesamtzeitraum zeigte zuletzt einen negativen Trend auf.

Die lokal gewichtete Regression für die Messstelle Wittlich (Abb. 42 unten) weist von den 1950er Jahren bis in die 2010er Jahre eine fallende Tendenz auf, bei insgesamt überdurchschnittlich großer Amplitude. Nach den ausgesprochen defizitären Jahren 2003 bis 2013 ist seit 2014 eine geringfügig steigende Tendenz zu erkennen.

Die Tendenz der Quellschüttungsganglinie Rothansenhof (Abb. 43 oben) weist über die gesamte Zeitreihe eine weitgehend ausgeglichene Tendenz auf. Seit Beginn der 1990er Jahre zeigt sich eine leicht abnehmende Tendenz.

Die Quellschüttungsganglinie der Nächstquelle (Abb. 43 unten) weist über den Gesamtzeitraum eine überwiegend ausgeglichene Tendenz auf. Während des letzten Jahrzehnts ist eine leicht fallende 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 2011-2020

Der beobachtete Rückgang der Grundwasserstände und Quellschüttungen der meisten Messstellen zeigt sich auch bei Betrachtung der jeweiligen mittleren landesweiten Sickerwasserraten in der jüngsten Dekade 2011 bis 2020 gegenüber dem langjährigen Mittel 1971-2000. So betrug die durchschnittliche Sickerwasserrate in Baden-Württemberg nur 84 %, in Bayern nur 83 % vom langjährigen Mittel. In Rheinland-Pfalz erreichte sie sogar nur 77 %. Während im für die Grundwasserneubildung wichtigen Winterhalbjahr während der vergangenen zehn Jahre einzig im Januar ein Überschuss zu verzeichnen war, zeigte sich ein markanter Rückgang der Sickerwasserrate während des Frühjahrs (März bis April) (vgl. Abb. 44). Da in diesem Zeitraum ein Großteil der jährlichen Grundwasserneubildung erfolgt, hat diese jüngste Entwicklung weitreichende Auswirkungen auf die Grundwasserstände. Dies spiegelt sich auch in den gezeigten Grundwasserständen und Quellschüttungen der Abb. 42 und Abb. 43 wider.

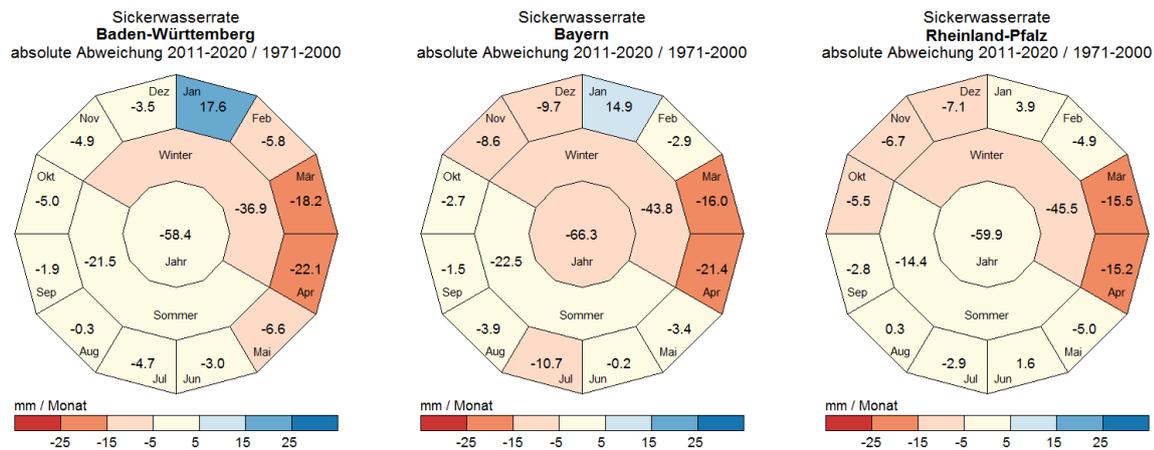


Abb. 44: Mittlere innerjährliche absolute Änderung der Sickerwasserrate in den drei KLIWA-Ländern. Vergleich des Zeitraums 2011–2020 mit dem langjährigen Mittel 1971–2000. Angaben in mm über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den Mitteln.

Grundwasserneubildung aus Niederschlag im Zeitraum 1951–2020

Die jährlichen Grundwasserneubildungshöhen sind für die hydrogeologischen Einheiten Südwesteifel (Abb. 45), fluvioglaziale Schotter (Abb. 46), Schwarzwald (Abb. 47) und Muschelkalkplatten (Abb. 48) für den Zeitraum 1951 bis 2020 dargestellt. Die hydrogeologischen Einheiten entsprechen den zugeordneten, repräsentativen Messstellen (vgl. Abb. 41). Während in früheren Dekaden immer wieder auch Neubildungsreiche Jahre (> 75-Perzentil) zu verzeichnen waren, beginnt mit dem Hitze- und Trockenjahr 2003 in allen vier Einheiten eine nunmehr 18-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 der Fall.

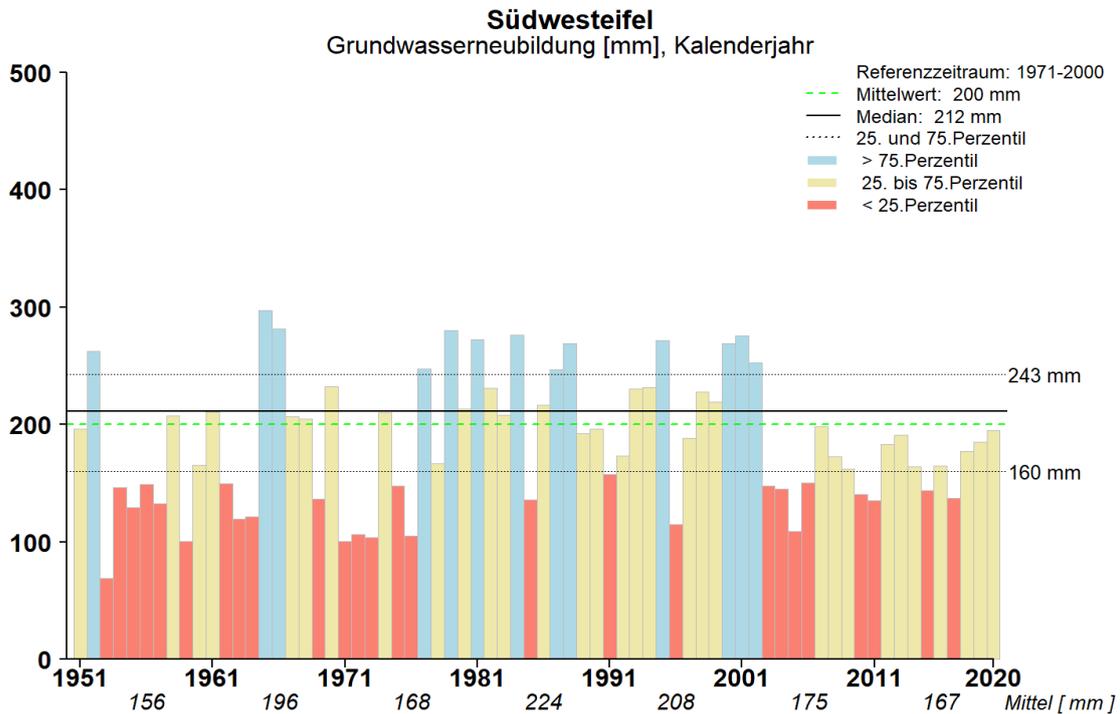


Abb. 45: Entwicklung der jährlichen Grundwasserneubildung aus Niederschlag in der Südwesteifel im Zeitraum 1951-2020. Angaben in mm/a.

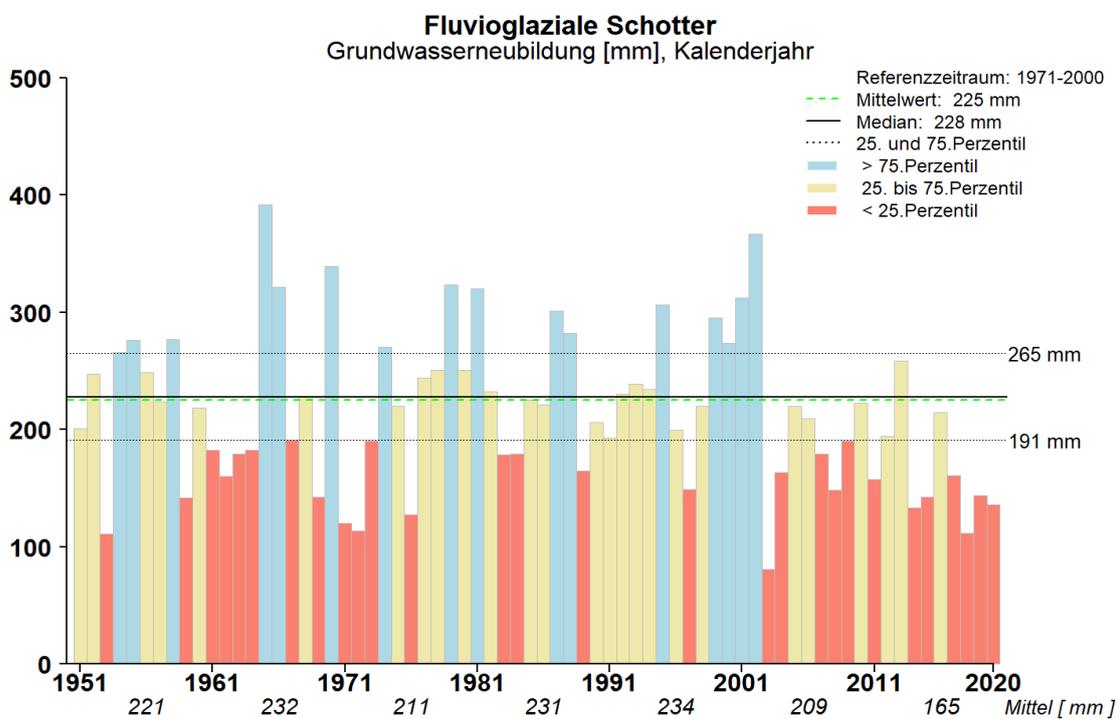


Abb. 46: Entwicklung der jährlichen Grundwasserneubildung aus Niederschlag im Bereich fluvio-glazialer Schotter im Zeitraum 1951-2020. Angaben in mm/a.

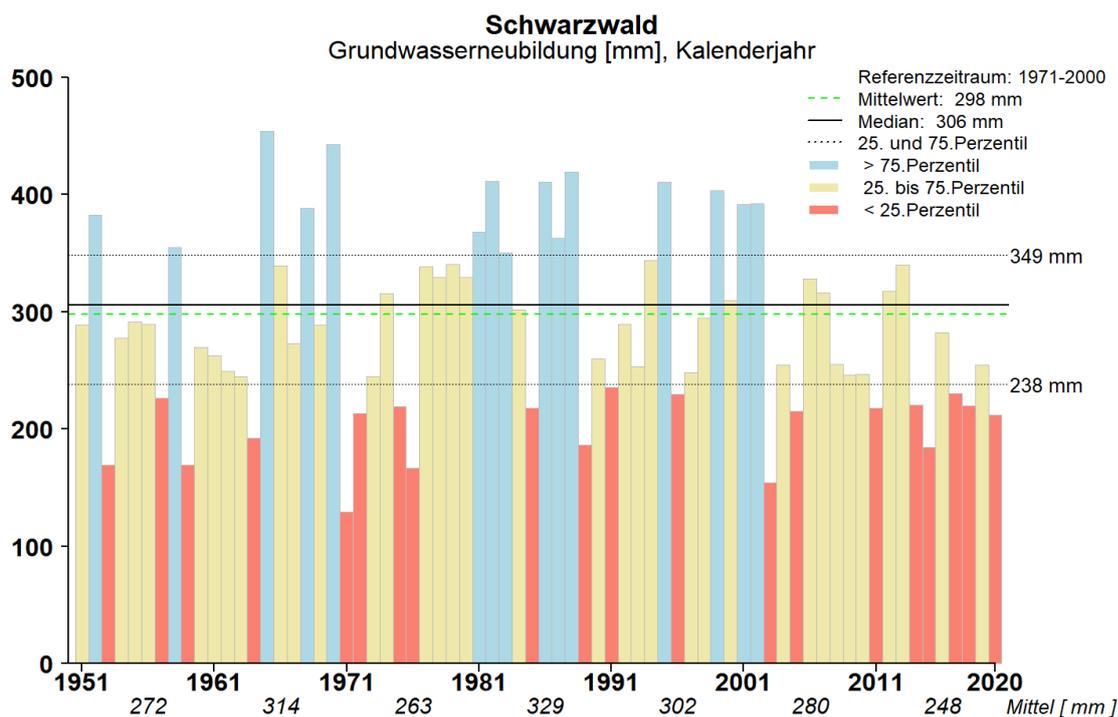


Abb. 47: Entwicklung der jährlichen Grundwasserneubildung aus Niederschlag im Schwarzwald im Zeitraum 1951-2020. Angaben in mm/a.

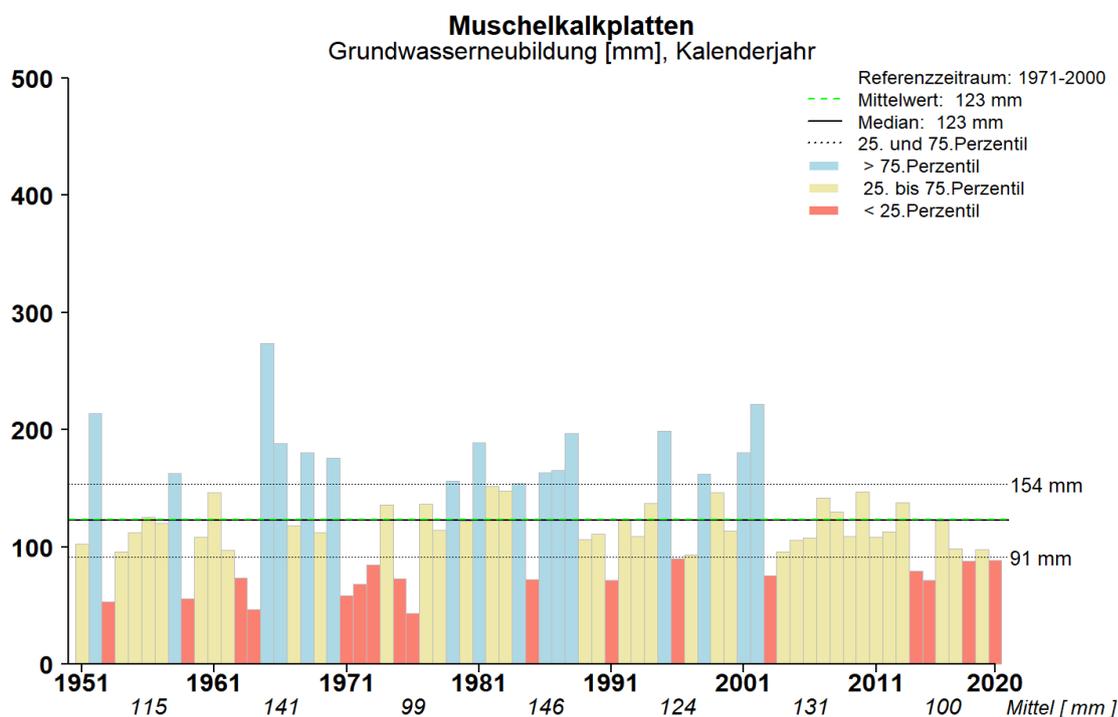


Abb. 48: Entwicklung der jährlichen Grundwasserneubildung aus Niederschlag im Bereich der Muschelkalkplatten im Zeitraum 1951-2020. Angaben in mm/a.



10 Gewässerökologie

10.1 Gewässerökologisches Klimafolgenmonitoring

Unsere Gewässer sind seit Jahrhunderten infolge der Nutzung durch den Menschen einer zunehmenden Überformung ausgesetzt. Natürliche, vollständig unbeeinflusste Gewässerökosysteme existieren in Mitteleuropa kaum noch. Häufig sind diese auf siedlungsferne, kleinere Gewässer bzw. Gewässerabschnitte beschränkt, z. B. in Gebirgslagen und Oberläufen. An den meisten Gewässern wirkt eine Vielzahl unterschiedlicher anthropogener Einflussfaktoren, welche direkte oder indirekte Auswirkungen auf die biotischen und abiotischen Verhältnisse und damit auf die Lebensraumbedingungen der aquatischen Lebensgemeinschaften haben. Dabei stehen sie oft miteinander in Interaktion, was zu additiven (summierte Wirkung), synergistischen (verstärkende Wirkung) oder antagonistischen (abschwächende Wirkung) Effekten führen kann. Diese Effekte können sich zudem überlagern, so dass sie insgesamt nur schwierig differenziert bzw. identifiziert werden können.

In diesem komplexen Wirkungsgefüge kommt der Wassertemperatur, als Umweltfaktor, der viele biologische und physikalische Prozesse beeinflusst bzw. steuert, eine maßgebliche und zentrale Bedeutung zu. Sie ist zudem im besonderen Umfang von klimawandelbezogenen Veränderungen wie dem Lufttemperaturanstieg betroffen. Höhere Wassertemperaturen im Sommer beeinträchtigen die Sauerstoffverfügbarkeit für aquatische Organismen und können in stehenden Gewässern beispielsweise zu Veränderungen im Schichtungsverhalten und der Verdunstungsbilanz führen und damit auch die aquatischen Habitatbedingungen verändern. In Fließgewässern können diese Temperatureffekte durch weitere anthropogene Einflussfaktoren verstärkt werden, wie z. B. durch veränderte hydrologische und hydraulische Dynamik infolge von Stauhaltung, Entnahmen oder Einleitungen sowie fehlende Beschattung infolge nutzungsbedingt defizitärer Ufervegetation. In der Folge ist eine Beeinträchtigung der natürlichen Verteilung der an die unterschiedlichen Bedingungen im Längsverlauf von Fließgewässern angepassten Lebensgemeinschaften möglich. Das kann sich beispielsweise durch eine Verschiebung der an kühle Lebensräume angepassten (kaltstenothermen) Organismengruppen in den Oberläufen in Richtung der Quellregionen äußern, aber auch durch veränderte Artenspektren durch den kompletten Ausfall oder die Verdrängung solcher Arten.

Um den klimawandelbedingten Anstieg der Wassertemperatur und die damit verbundenen potenziellen Folgen für gewässerökologische Prozesse und Besiedlungsmuster aquatischer Organismen wissenschaftlich erfassen und bewerten zu können, ist es zielführend den Blick auf anthropogen möglichst wenig beeinflusste Gewässer zu richten. Aufgrund des fehlenden oder gering ausgeprägten Einflusses anderer anthropogener Faktoren können eindeutige Klimasignale mit höherer Wahrscheinlichkeit nachgewiesen werden. Für das langfristig angelegte gewässerökologische Klimafolgenmonitoring wurden demzufolge Messstellen an möglichst unbeeinflussten Gewässern mit hoher typspezifischer Biodiversität ausgewählt. Um dabei auf mögliche Synergien zurückgreifen zu können, wurden meist Messstellen einbezogen, an denen bereits in der Vergangenheit in Bezug zur EU-Wasserrahmenrichtlinie entsprechende biologische Monitoringdaten erhoben wurden. Auf der Basis der so generierten Zeitreihen sollen zukünftig statistisch belastbare Aussagen möglich sein, um trotz der großen interannuellen (im Jahresvergleich) Variabilität potenzielle, langfristige und durch den Klimawandel hervorgerufene Effekte auf gewässerökologische Zusammenhänge zu erfassen. Der Umfang der bislang erhobenen Daten lässt eine solch umfassende Betrachtungsweise momentan noch nicht zu, wodurch hier zunächst auf eine Ergebnisdarstellung verzichtet werden muss. Jedoch sind bereits Teilaspekte auf der Basis kürzerer Zeitreihen und spezieller Fragestellungen betrachtet worden, wie beispielsweise im



Kurzbericht zu den Auswirkungen des Hitzejahres 2018 auf die Temperatur und die Schichtungsdauer von Seen am Beispiel des Laacher Sees, RP und des Ammersees, BY [KLIWA 2020]. Dieser Kurzbericht ist im entsprechenden Downloadbereich der Projekthomepage frei zugänglich.

Im Folgenden werden das Messnetz (Abb. 49, Tab. 3) und Messprogramme an den Seen und Fließgewässern innerhalb der KLIWA-Kooperation überblicksweise beschrieben.

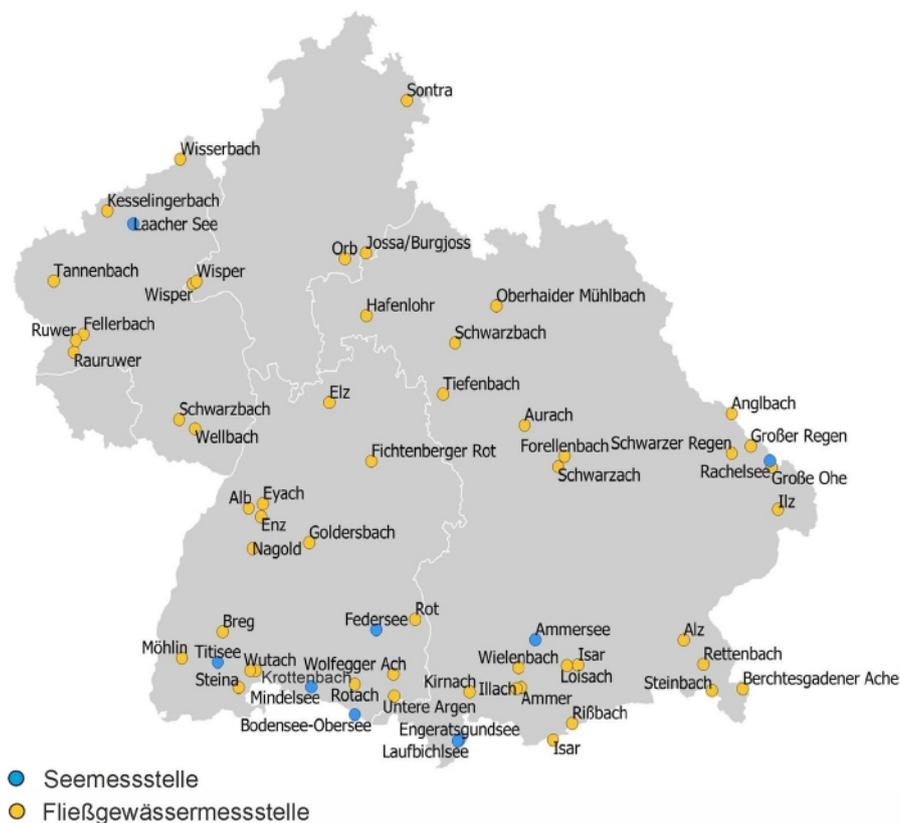


Abb. 49: Lage der Messstellen für das gewässerökologische Klimafolgenmonitoring.

Tab. 3: Messstellenübersicht für das gewässerökologischen Klimafolgenmonitoring.

| Gewässerökologisches Klimafolgenmonitoring | | |
|--|------------------------------|---------------------|
| Bundesland | Messstellen Fließgewässer | Messstellen Seen |
| BW | 16 | 4 |
| BY | 24 | 4 |
| HE | 6 | - |
| RP | 8 | 1 |
| KLIWA Gesamt | 54 | 9 |

Das Messnetz der Fließgewässer umfasst für den süddeutschen Raum typische Mittelgebirgsbäche und -flüsse sowie Fließgewässer der Alpen und des Alpenvorlandes, deren natürlicher Charakter einen Einfluss klimatischer Veränderungen messbar erscheinen lässt (Tab. 4).

Tab. 4: Messstellenverteilung über die LAWA-Fließgewässertypen [POTTGIESSER 2018] und die Bundesländer unter Berücksichtigung der Biologischen Qualitätskomponenten (BQK).

| Klimafolgenmonitoring Fließgewässer | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------------|-----------|-----------|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Bundesland | Messstellen | BQK | | LAWA Gewässertypen | | | | | | | | | | | | | | |
| | | MZB | Fische | 1.1 | 1.2 | 2.1 | 2.2 | 3.1 | 3.2 | 5 | 5.1 | 6_K | 7 | 9 | 9.1 | 9.1_K | 11 | 21_S |
| BW | 16 | 16 | 11 | | | 1 | 1 | | 2 | 3 | 4 | 2 | 1 | 1 | 1 | | | |
| BY | 24 | 24 | 17 | 3 | 3 | | | 3 | 1 | 3 | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| HE | 6 | 6 | 5 | | | | | | | | 1 | | 1 | 4 | | | | |
| RP | 8 | 8 | 8 | | | | | | | 3 | 3 | | | 2 | | | | |
| KLIWA Gesamt | 54 | 54 | 41 | 3 | 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 9 | 9 | 5 | 3 | 9 | 2 | 1 | 1 | 1 |

Neben der kontinuierlichen Messung der Wassertemperatur und des Abflusses (teilweise modellgestützt punktgenau berechnet) werden regelmäßig Daten zu Gewässerfauna und teilweise auch -flora im Rahmen eines biologischen Monitorings erhoben (Abb. 50). Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf den aquatischen Wirbellosen (Makrozoobenthos, MZB) und den Fischen, die als wichtige biologischen Qualitätskomponenten auch für die ökologische Bewertung von Gewässern nach Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) große Bedeutung haben. Außerdem wird in der Regel durch monatliche Messungen ein abgestimmtes Set an chemisch-physikalischen Parametern erfasst.



Abb. 50: Monitoringaktivitäten in Fließgewässern: a) Wassertemperatur-Datenlogger, b) Beprobung der aquatischen Wirbellosen (Makrozoobenthos), c) Untersuchung der Fischfauna (Elektrofischung).

Die Datenaufnahmen des gewässerökologischen Klimafolgenmonitorings der Seen entsprechen den Erfordernissen dieser Ökosysteme, orientieren sich grundsätzlich aber ebenfalls an den physikalisch-chemischen Randbedingungen sowie an wichtigen biologischen Besiedlungsparametern (hier insbesondere Phyto- und Zooplankton). Dabei gilt es jedoch insbesondere auch die vertikale Dimension zu berücksichtigen, wodurch Tiefenprofile zur Erfassung des Schichtungsverhaltens bei der Datenerfassung eine größere Rolle spielen. Dazu werden kontinuierliche Messungen der Wassertemperatur und des Sauerstoffgehaltes parallel in verschiedenen Gewässertiefen durchgeführt. Außerdem sind im Vergleich zu den Fließgewässern aufgrund der größeren Abhängigkeit von den meteorologischen Bedingungen entsprechende Begleitparameter, wie z. B. Globalstrahlung, Windstärke und -richtung oder Lufttemperatur, von besonderem Interesse.

Eine detaillierte Übersicht über die untersuchten Gewässer und die Art der erhobenen Daten sind in Form einer Ergänzung zum Monitoringbericht 2021 auf der Internetseite von KLIWA (www.kliwa.de) als „Zusätzliche Auswertungen zum Monitoringbericht 2021 – Gewässerökologie“ zum Download verfügbar.



Abb. 51: Monitoringaktivitäten in Seen: a) Integrierender Schöpfer zur Chemie- und Phytoplanktonprobenahme, b) Probenahme mit Bellyboot (Laufbichlsee), c) Zooplankton-Beprobung (Laacher See), d) Messboje mit Datenloggern im Tiefenprofil und Meteorologiemessaufbau im Einsatz (Titisee).

10.2 Temperatur und Durchmischung des Bodensees

Zustand und Entwicklung des Bodensees werden seit langem intensiv untersucht. Ein kontinuierliches Monitoring wird seit den 1960er Jahren im Rahmen der Zusammenarbeit der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) durchgeführt (www.igkb.org). Für Baden-Württemberg führt das Institut für Seenforschung der LUBW diese Messuntersuchungen durch. Mit Hilfe der dabei erfassten biologischen, chemischen und hydrophysikalischen Messdaten lassen sich viele Veränderungen des Sees nachvollziehen oder auch frühzeitig erkennen (vgl. z.B. KLIWA Heft 11). Auch der Einfluss der klimatischen Veränderungen zeichnet sich in den Messbeobachtungen ab. Veränderungen im Wärmehaushalt werden in den Temperaturzeitreihen (Abb. 52) deutlich. Die Jahresmittelwerte der Lufttemperaturen, gemessen in Konstanz, lagen in den letzten 3 Jahrzehnten im Durchschnitt um 1,3 °C höher als im Vergleichszeitraum von 1962 bis 1990. Die Wassertemperaturen nahe der Seeoberfläche waren 1,2 °C wärmer. Im Tiefenwasser sind die Temperaturen in diesen Zeiträumen im Mittel um 0,3 °C gestiegen. Die Wassertemperaturen wurden hierbei in der Regel in 2 bis 4-wöchigem Abstand in der Mitte des Sees gemessen.

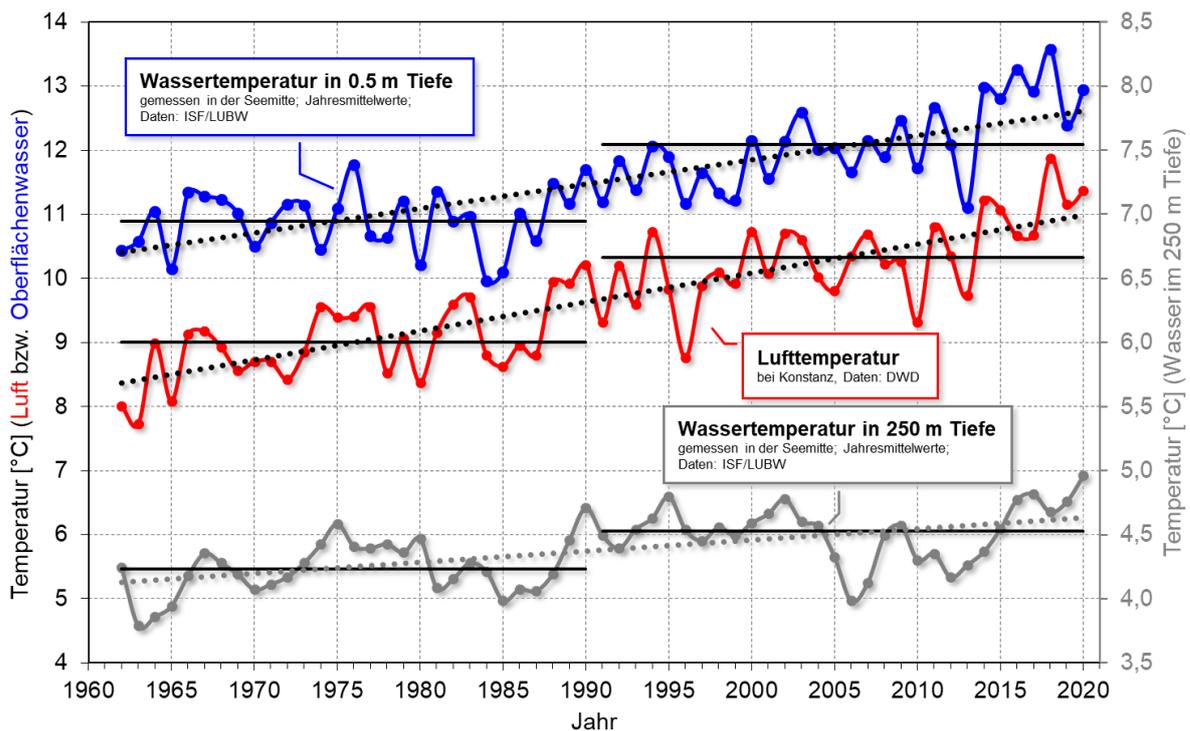


Abb. 52: Jahresmittel der Lufttemperaturen bei Konstanz (rot, Skala links), der Wassertemperaturen nahe der Oberfläche (blau, Skala links) und im Tiefenwasser (grau, Skala rechts) in der Mitte des Bodensee-Obersees. Dargestellt sind auch die Mittelwerte für die beiden Zeiträume 1962 bis 1990 und 1991 bis 2020 (durchgezogene schwarze Linien) und die linearen Trendgeraden (gepunktete Linien).

Die Temperaturverhältnisse im Bodensee beeinflussen die hydrobiologischen und hydrochemischen Abläufe im See und sie sind maßgeblich für die Schichtungs- und vertikalen Durchmischungsvorgänge. 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 Wasser- und Stoffaustauschs beiträgt. Von Bedeutung für die vertikale Durchmischung bis in die Tiefe des Sees sind jedoch besonders die winterlichen Temperaturverhältnisse. Erst durch eine hinreichende Auskühlung des Wassers löst sich die thermische Schichtung auf und ermöglicht eine effiziente vertikale Durchmischung des Sees. Damit wird Sauerstoff in das Tiefenwasser befördert, wo dieser durch mikrobielle Abbauprozesse gezehrt wird. Niedrige Sauerstoffgehalte auf Grund eines unzureichenden Nachschubs aus den oberen Wasserschichten wirken sich z.B. schädlich auf die Entwicklung von Fischeiern aus, welche auf dem Seegrund abgelegt werden, oder begünstigen die Rücklösung von Phosphor oder Schwermetallen aus dem Sediment. Sie verändern also die Lebensraumverhältnisse und die Wasserqualität.

Der winterliche vertikale Austausch bringt andererseits Nährstoffe, welche sich in der Tiefe des Sees angesammelt haben, in die Deckschicht, also in den lichtdurchfluteten Bereich, in dem sich Algen in Abhängigkeit von den Nährstoffverhältnissen entwickeln. Damit hat die winterliche vertikale Durchmischung einen bedeutenden Einfluss auf das Nahrungsnetz des Sees.

Mit der klimatischen Erwärmung hat sich der winterliche Tiefenwasseraustausch zunehmend verschlechtert. Es treten häufiger mehrjährige Phasen auf, in denen das Tiefenwasser nur unzureichend mit sauerstoffreichem Wasser aus den oberen Schichten durchmischt wird. Dies spiegelt sich auch in der Durchmischung anderer Wasserinhaltsstoffe wieder, wie etwa dem Orthophosphat, welches sich durch das Absinken und die Zersetzung von Biomasse im Tiefenwasser anreichert. Aus den Konzentrationsverteilungen dieses Messparameters lassen sich Kennwerte



für die Ausprägung der winterlichen Durchmischung ableiten, welche den Trend zu einem schlechteren winterlichen vertikalen Austausch veranschaulichen (Abb. 53). Prognostische Untersuchungen, wie sie z.B. im Interreg-Projekt KlimBo der IGKB (www.igkb.org/aktuelles/klimbo-klimawandel-am-bodensee) durchgeführt wurden, lassen erwarten, dass sich diese Entwicklung durch die klimatische Erwärmung weiter fortsetzt und damit auch die Gefahr steigt, dass kritische Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser erreicht werden. Der Durchmischungskennwert bzw. Durchmischungsindex ist im KLIWA-Heft 11 definiert [KLIWA 2007, S.25-28].

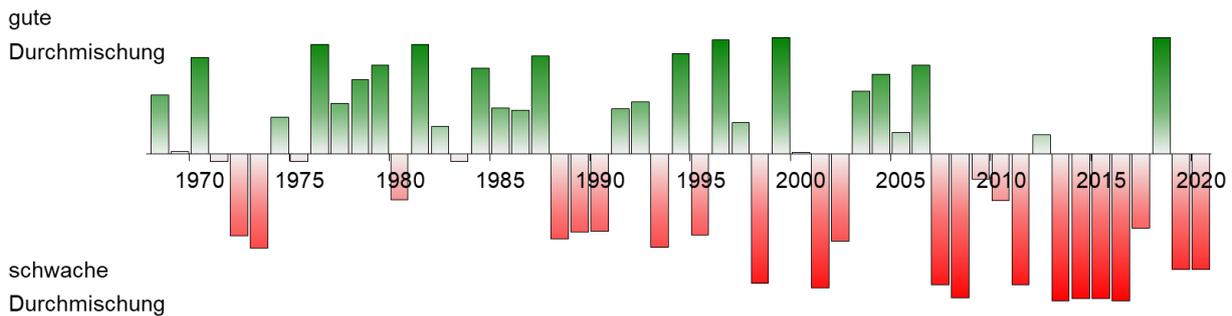


Abb. 53: Der Durchmischungskennwert zeigt an, wie wirksam die winterliche Durchmischung zum Ausgleich vertikaler Konzentrationsunterschiede von Wasserinhaltsstoffen (hier von Orthophosphat) beigetragen hat.

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 zusammenfassend dargestellt sind. Grundlage dieser Monitoringergebnisse sind zahlreiche lange Messreihen, die ab etwa 1930 in ausreichender Zahl vorliegen, so dass regionale Auswertungen durch Zusammenfassung von Stationsreihen und damit belastbare Aussagen über regionale Veränderungen 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.



Abb. 53: Beispielbilder von meteorologischen und hydrologischen Messeinrichtungen.



12 Literaturverzeichnis

- BLfU 2020: Niedrigwasser 2018 und 2019 – Analysen und Auswirkungen für Bayern; Bayerisches Landesamt für Umwelt; Augsburg, 2020
- 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 2021: Fortschreibung der Trendauswertungen an Grundwasser-Messstellen und Quellen, IAWG, Ottobrunn, 2021
- IPCC 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press; siehe auch: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf
- KLIWA 2002: KLIWA Heft 2: Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern, 98 S., ISBN 978-3-88251-284-9, Karlsruhe 2002
- KLIWA 2003: KLIWA Heft 3: Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse in Baden-Württemberg und Bayern, 93 S., ISBN 978-3-8851-286-5, Karlsruhe 2003
- KLIWA 2005a: KLIWA Heft 5: Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern, 76 S., ISBN 978-3-937911-17-0, München 2005
- KLIWA 2005b: KLIWA Heft 6: Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern, 88 S., ISBN 978-3-937911-18-9, München 2005
- KLIWA 2005c: KLIWA Heft 7: Langzeitverhalten des Gebietsniederschlages in Baden-Württemberg und Bayern, 160 S.; ISBN 978-3-937911-19-7, München 2005
- KLIWA 2006: KLIWA Heft 8: Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern, 93 S., ISBN 978-3-88148-412-4, Offenbach 2006
- KLIWA 2007: KLIWA Heft 11: Zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee, 99 S., ISBN 978-3-88251-326-4, Karlsruhe 2007
- KLIWA 2008a: 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 2008b: Monitoringbericht 2008: Klimawandel in Süddeutschland, Veränderung der Kenngrößen Lufttemperatur, Niederschlag und Hochwasserabfluss – Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA, 24 S., veröffentlicht auf der Internetseite <http://www.kliwa.de> 2008
- KLIWA 2009: KLIWA Heft 14: Auswirkung des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, ISBN 978-3-88251-346-2, Karlsruhe 2009
- KLIWA 2011a: KLIWA Heft 16: Langzeitverhalten von Grundwasserständen und Quellschüttungen, ISBN 978-3-88251-362-2, Karlsruhe 2011
- KLIWA 2011b: Monitoringbericht 2011: Klimawandel in Süddeutschland, Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen – Klimamonitoring

- im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA, 40 S., veröffentlicht auf der Internetseite <http://www.kliwa.de> 2011
- KLIWA 2016: Monitoringbericht 2016: Klimawandel in Süddeutschland, Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen – Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA, veröffentlicht auf der Internetseite <http://www.kliwa.de> 2016
- KLIWA 2017: KLIWA Heft 21: Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen (1951-2015), ISBN 978-3-88251-395-0, Karlsruhe 2017
- KLIWA 2019a: Starkniederschläge - Entwicklungen in Vergangenheit und Zukunft. Kurzbericht, veröffentlicht auf der Internetseite <http://www.kliwa.de> 2019
- KLIWA 2019b: Das Jahr 2018 im Zeichen des Klimawandels? Viel Wärme, wenig Wasser in Süddeutschland. Kurzbericht, veröffentlicht auf der Internetseite <http://www.kliwa.de> 2019
- KLIWA 2020: Auswirkungen des "Rekordjahres" 2018 auf Temperatur und Schichtungsdauer von Seen. Kurzbericht, veröffentlicht auf der Internetseite <http://www.kliwa.de> 2020.
- KOSTRA-DWD-2010R 2017: Junghänel, T. Ertel, H. und Deutschländer T.: Bericht zur Revision der koordinierten Starkregenregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes in der Version 2010. Deutscher Wetterdienst – Hydrometeorologie, Offenbach; siehe auch https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/download/bericht_revision_kostra_dwd_2010.pdf
- KREIENKAMP ET AL. 2021: Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021, siehe auch <https://www.worldweatherattribution.org/wp-content/uploads/Scientific-report-Western-Europe-floods-2021-attribution.pdf>
- LENGFELD ET AL. 2021: CatRaRE: A Catalogue of radar-based heavy rainfall events in Germany derived from 20 years of data, Meteorologische Zeitschrift Vol. 30 (6), siehe auch <http://dx.doi.org/10.1127/metz/2021/1088>
- MAIER, MÜLLER-WESTERMEIER 2010: Verifikation klimatologischer Rasterfelder, Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 235, Offenbach 2010
- MÜLLER-WESTERMEIER 1995: Numerisches Verfahren zu Erstellung klimatologischer Karten, Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 193, Offenbach 1995.
- POTTGIESSER 2018: Die deutsche Fließgewässertypologie, Zweite Überarbeitung der Steckbriefe der Fließgewässertypen, siehe auch https://www.gewaesser-bewertung.de/index.php?article_id=11&clang=0
- WINTERRATH ET AL. 2017: Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie, Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 251, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, siehe auch: https://www.dwd.de/DE/leistungen/pbfb_verlag_berichte/pdf_einzelbaende/251_pdf.pdf



Herausgeber:

Arbeitskreis KLIWA

- Deutscher Wetterdienst;
- LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg;
- Landesamt für Umwelt 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>