

# Kurzpapier des Klima-Sachverständigenrats

---

**0110912023**

Klimawandelbedingte Gebietsniederschlagsänderung in  
Baden-Württemberg von 1881 bis 2099

Maike Schmidt

Dirk Schindler

Almut Arneth

Sven Kesselring

Sabine Löbbbe

Martin Pehnt

## **Klima-Sachverständigenrat:**

### **Dipl.-Ing. Maike Schmidt (Vorsitzende)**

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)  
Meitnerstr. 1, 70563 Stuttgart  
E-Mail: maike.schmidt@zsw-bw.de  
Telefon: +49 711 78 70-250

### **Professor Dr. Dirk Schindler (Stellvertretender Vorsitzender)**

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Werthmannstrasse 10, 79085 Freiburg  
E-Mail: dirk.schindler@meteo.uni-freiburg.de  
Telefon: +49 761 203 3588

### **Professor Dr. Almut Arneth**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Kreuzeckbahnstraße 19, 82467 Garmisch-Partenkirchen  
E-Mail: almut.arneth@kit.edu  
Telefon: +49 8821 183-131

### **Professor Dr. Sven Kesselring**

Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU)  
Parkstraße 4, 73312 Geislingen  
E-Mail: sven.kesselring@hfwu.de  
Telefon: +49 7331 22525

### **Professor Dr. Sabine Löbbe**

Hochschule Reutlingen  
Alteburgstraße 150, 72762 Reutlingen  
E-Mail: sabine.loebbe@reutlingen-university.de  
Telefon: +49 7121 271-7127

### **Dr. Martin Pehnt**

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH (ifeu)  
Wilckensstraße 3, 69120 Heidelberg  
E-Mail: martin.pehnt@ifeu.de  
Telefon: +49 6221 4767 0

Diese Stellungnahme beruht auch auf der sachkundigen und engagierten Arbeit unserer wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter:

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW): **Laura Liebhart**

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg: **Dr. Christopher Jung**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT): **Tobias Laimer**

Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU): **Claus Seibt**

Hochschule Reutlingen: **Dr. André Hackbarth**

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH (ifeu): **Dr. Sara Ortner**

---

# Inhalt

<b>1. Zusammenfassung .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Hintergrund.....</b>	<b>7</b>
<b>3. Messwertbasierte Niederschlagsentwicklung von 1881 bis 2022 .....</b>	<b>8</b>
3.1 Jahresniederschläge.....	8
3.2 Jahreszeitliche Niederschläge .....	12
3.3 Zusammenfassung der Niederschlagsentwicklung von 1881 bis 2022.....	16
<b>4. Modellwertbasierte Niederschlagsentwicklung von 1950 bis 2099.....</b>	<b>18</b>
4.1 Jahresniederschläge.....	19
4.2 Jahreszeitliche Niederschläge .....	22
4.3 Zusammenfassung des Mess- mit Modellwertvergleichs von 1950 bis 2099.....	25
<b>5. Schlussfolgerungen.....</b>	<b>27</b>
<b>6. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>29</b>

## 1. Zusammenfassung

In seiner Beratungsfunktion für die Landesregierung und den Landtag Baden-Württemberg legt der Klima-Sachverständigenrat Baden-Württemberg (K-SVR) mit dem vorliegenden Kurzpapier eine Untersuchung zur Entwicklung des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg für den Zeitraum 1881-2099 vor. Die Ergebnisse der Untersuchung der vergangenen Entwicklung zeigen einen bereits viele Jahrzehnte andauernden Rückgang des Gebietsniederschlags (Abbildung 1). Besonders stark ausgeprägt ist der Rückgang der jährlichen Gebietsniederschlagsmengen in den letzten vier Jahrzehnten (-40 mm/10 Jahre). Im gleichen Zeitraum ist die Lufttemperatur klimawandelbedingt sehr stark angestiegen (+0.41 °C/10 Jahre). Anders als der klimawandelbedingte Lufttemperaturanstieg weist die langfristige Gebietsniederschlagsentwicklung deutlich stärkere Schwankungen auf, die mehrere Jahrzehnte andauern können. Die gegenläufigen Entwicklungen von Gebietsniederschlag (Rückgang) und Lufttemperatur (Anstieg) führten in den vergangenen Jahrzehnten zu einer verringerten Wasserverfügbarkeit im Land. Die verringerte Wasserverfügbarkeit ergibt sich dabei zum einen direkt aus dem flächigen Rückgang des Wasserdargebots aus der Atmosphäre, da Gebietsniederschlagsrückgänge in allen Jahreszeiten nachweisbar sind. Zum anderen sorgt der klimawandelbedingte Lufttemperaturanstieg ganzjährig für höhere Verdunstungsraten, die als zusätzlicher Verlust des an der Erdoberfläche zur Verfügung stehenden Wassers betrachtet werden müssen. Auf der Grundlage des gegenwärtigen Wissensstandes ist davon auszugehen, dass die Lufttemperatur in den kommenden Jahrzehnten in Europa, und damit auch in Baden-Württemberg, noch erheblich weiter ansteigen wird. Durch den zu erwartenden Lufttemperaturanstieg wird auch die wärmeabhängige Verdunstung auf der gesamten Fläche Baden-Württembergs weiter zunehmen.

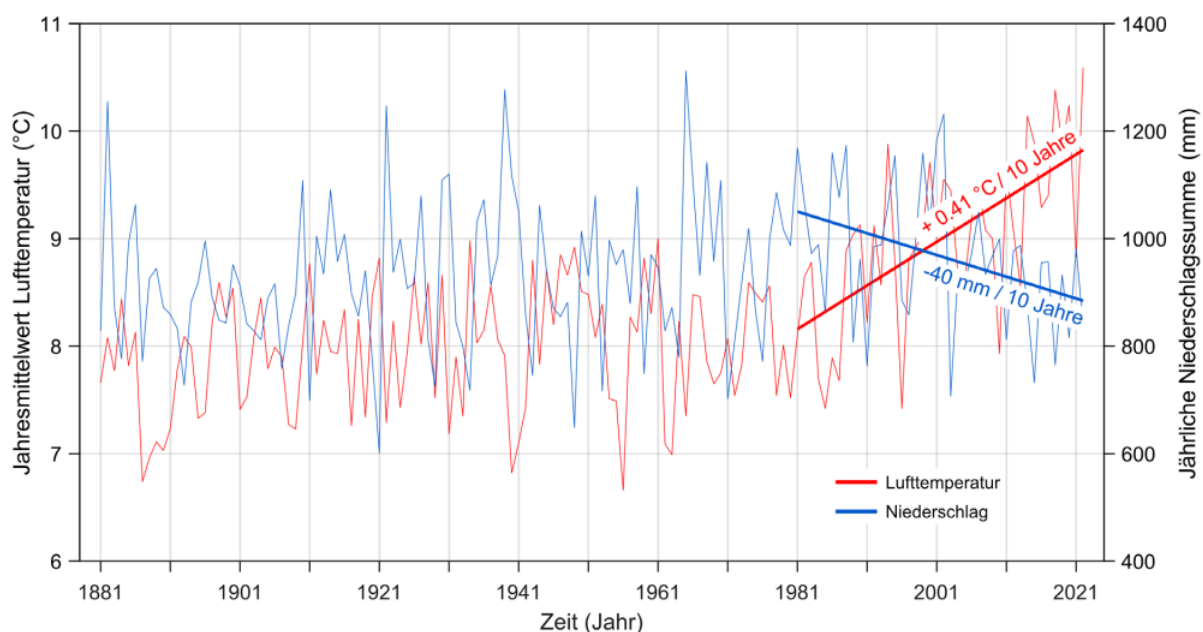


Abbildung 1: Entwicklung des jährlichen Lufttemperaturmittelwerts und der jährlichen Gebietsniederschlagssumme in Baden-Württemberg von 1881 bis 2022. Die beiden Trendgeraden veranschaulichen die klimawandelbedingte mittlere 10-jährige Lufttemperatur- und Niederschlagsänderung im Zeitraum 1981-2022.

Klimamodelle können nicht nur die zukünftige Lufttemperaturerhöhung abbilden, sondern geben auch Einblicke in die Entwicklung der Gebietsniederschläge. Allerdings ist die durch Klimamodelle projizierte Entwicklung der Gebietsniederschläge mit weit höheren Unsicherheiten behaftet als die Projektion der zukünftigen klimawandelbedingten Lufttemperaturentwicklung. Da die für Baden-Württemberg aus Messungen berechneten Gebietsniederschlagsmengen bereits in der Vergangenheit meistens unterhalb der mit Klimamodellen abgeschätzten Gebietsniederschlagsmengen lagen, ist eine aufmerksame Beobachtung der aktuellen Entwicklung geboten. Aus heutiger Sicht ist in den kommenden Jahrzehnten mit einer weiter abnehmenden Niederschlagswasserverfügbarkeit in Baden-Württemberg zu rechnen.

Die Ergebnisse der Analyse haben eine hohe Relevanz sowohl für den Klimaschutz als auch für die Klimawandelanpassung. Der konsequenten Umsetzung wirksamer Klimaschutzmaßnahmen kommt eine noch höhere Bedeutung zu, um das Eintreten der Worst-Case-Szenarien noch zu verhindern. Gleichzeitig müssen Klimawandelanpassungsmaßnahmen mit einer neuen Vehemenz zeitnah entwickelt und umgesetzt werden, um Baden-Württemberg als lebenswertes Land und starken Wirtschaftsstandort zu erhalten. Weit intensivere Maßnahmen zur Anpassung an Trockenheit und Hitze ebenso wie zur Speicherung und Nutzung von Regenwasser, insbesondere auch aus Starkregenereignissen, sind bereits in sehr naher Zukunft erforderlich, um den Zusammenhalt der Gesellschaft nicht zu gefährden.

Da die Kombination von Gebietsniederschlagsrückgang und steigender Lufttemperatur bereits zu massiven Veränderungen der Wasserverfügbarkeit in Baden-Württemberg geführt hat, sind umfassende Maßnahmen zur konsequenten Rückhaltung jeglichen Niederschlagswassers notwendig, um die im Land nutzbare Niederschlagswassermenge langfristig zu erhalten. Dies erfordert den raschen, landesweiten Aufbau einer Niederschlagswasserrückhalte-,

---

Niederschlagswasserspeicherungs- und Niederschlagswasserverteilungsinfrastruktur. Gleichzeitig müssen alle Teile der Gesellschaft durch Wassersparen aktiv zur raschen Reduktion des Wasserverbrauchs beitragen, denn selbst wenn das heutige Niederschlagsniveau konstant bleiben sollte, wird Trockenheit in Folge der steigenden Lufttemperatur weiter zunehmen. Treten niederschlagsbezogen Worst-Case-Entwicklungen ein, wird bei weiter rückläufigen Niederschlägen die ausreichende Wasserversorgung Gesellschaft und Wirtschaft vor neue Herausforderungen stellen, ähnlich wie dies in unseren Nachbarländern Italien und Frankreich schon zu beobachten ist.

## 2. Hintergrund

Der Klima-Sachverständigenrat (K-SVR) ist ein gemäß § 17 des Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz Baden-Württemberg (KlimaG BW) berufenes, unabhängiges Expertengremium, dessen Aufgabe es ist, die Landesregierung und den Landtag wissenschaftsbasiert, systemorientiert und sektorübergreifend zu Fragen des Klimaschutzes und der Klimawandelanpassung zu beraten. Im Rahmen dieser Beratungsfunktion kann der Klima-Sachverständigenrat auf eigenen Entschluss zu ausgewählten Themen eigenständig Papiere, Stellungnahmen oder Berichte gegenüber der Landesregierung und dem Landtag abgeben. Von diesem Recht macht der Klima-Sachverständigenrat mit dem vorliegenden Kurzpapier „Klimawandelbedingte Gebietsniederschlagsänderung in Baden-Württemberg von 1881 bis 2099“ Gebrauch.

Der Klima-Sachverständigenrat zeigt mit diesem Kurzpapier auf, wie dynamisch sich der Klimawandel in Baden-Württemberg in den letzten Dekaden entwickelt hat – eine Tatsache, die in den meisten Berichterstattungen bisher viel zu wenig Beachtung findet und aus der bislang auch nicht in ausreichendem Maße Handlungserfordernisse abgeleitet und umgesetzt werden.

Mit diesem Papier werden aktuelle Informationen zur Gebietsniederschlagsentwicklung in Baden-Württemberg präsentiert und die hieraus erwachsende Bedrohungslage für Baden-Württembergs Wirtschaft und Gesellschaft klar benannt. Der Klima-Sachverständigenrat unterstreicht damit die Dringlichkeit, mit welcher politische Entscheidungen und wirkungsvolles Regierungshandeln für mehr Klimaschutz und wirkungsvolle Klimawandelanpassung verfolgt werden müssen, um Baden-Württemberg als Wirtschaftsstandort und als lebenswertes Land für heutige und zukünftige Generationen zu erhalten.

## 3. Messwertbasierte Niederschlagsentwicklung von 1881 bis 2022

### 3.1 Jahresniederschläge

Zur Untersuchung der vergangenen klimawandelbedingten Veränderung des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg wendet der Klima-Sachverständigenrat zunächst eine Methode an, die dem Vorgehen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) ähnelt [1]. Das Vorgehen beruht auf der Anwendung von Trendgeraden, die über ihre Steigung die langfristige, mit dem vergangenen Klimawandel seit 1881 verbundene Gebietsniederschlagsentwicklung quantifizieren sollen. Die Lage der Trendgeraden wird aus Vergleichbarkeitsgründen auch über den gesamten Untersuchungszeitraum berechnet, obwohl diese Geraden aufgrund ihrer gleichbleibenden Steigung nicht geeignet sind, klimawandelbedingte, 30-jährige Veränderungen der atmosphärischen Umwelt abzubilden.

Betrachtet man die langfristige Entwicklung des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg über unterschiedlich lange Zeiträume, kommt man zu unterschiedlichen Interpretationen des Klimawandeleinflusses auf die Entwicklung. Je länger der Betrachtungszeitraum gewählt wird, desto eher deutet sich eine Zunahme der Jahresniederschläge von 1881 bis 2022 an.

Die Abbildung 2 veranschaulicht neben den jährlichen Niederschlagssummen, die vom DWD über das *Climate Data Center* als Gebietsmittelwerte für den Zeitraum 1881-2022 zur Verfügung gestellt werden [2], vier Trendgeraden für die Zeiträume 1881-2022, 1921-2022, 1951-2022 und 1981-2022.

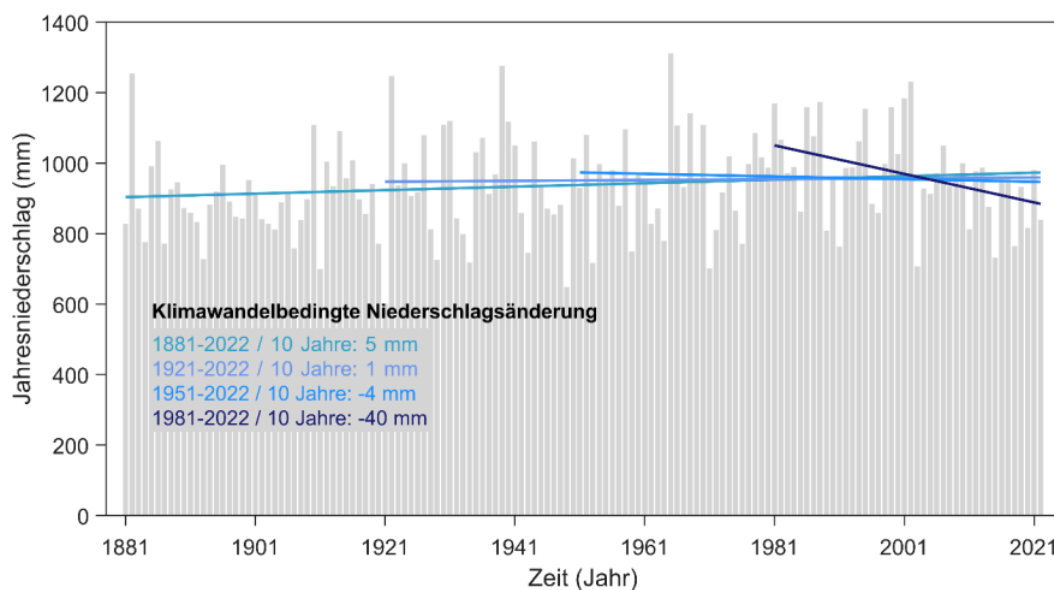


Abbildung 2: Jahressummen des mittleren Gebietsniederschlags im Zeitraum 1881-2022 in Baden-Württemberg (graue Säulen). Die in unterschiedlichen Blautönen eingefärbten Trendgeraden kennzeichnen die langfristige Änderung der jährlichen Niederschlagssumme in den Zeiträumen 1881-2022, 1921-2022, 1951-2022 und 1981-2022.



Die unterschiedliche Länge der Trendgeraden bildet unterschiedliche mittlere langfristige Veränderungen der jährlichen Gebietsniederschlagssummen in Baden-Württemberg ab. Alarmierend ist dabei, dass sich mit kürzer werdender Länge nicht nur die Trendgeradensteigung ändert, sondern auch ihre Richtung. Hier zeigt sich kein Anstieg der Niederschlagsmengen mehr, sondern eine deutliche Niederschlagsabnahme.

Das Ergebnis eines Mann-Kendall-Tests [3,4] zeigt, dass die Trendgerade über den gesamten Untersuchungszeitraum 1881-2022 signifikant (= überzufällig) ansteigt (Signifikanzniveau  $\alpha = 0.05$ ). Die mittlere, klimawandelbedingte 10-jährige Änderung der jährlichen Niederschlagssumme beträgt dann 5 mm. Für den Zeitraum 1921-2022 weist die Trendgerade ebenfalls noch eine positive, aber nicht mehr signifikante Steigung auf. Damit verbunden ist eine mittlere, klimawandelbedingte 10-jährige Änderung des jährlichen Niederschlags von 1 mm. Von 1951 bis 2022 weist die Trendgerade dann eine negative, jedoch nicht signifikante Steigung auf, die einer mittleren dekadischen Änderung des jährlichen mittleren Gebietsniederschlags von -4 mm entspricht. Ab dem Jahr 1981 nimmt die jährliche Niederschlagssumme im Mittel signifikant alle zehn Jahre um -40 mm ab. Im Zeitraum 1981-2022 entspricht der gesamte Rückgang der jährlichen Niederschlagssumme entlang der Trendgeraden damit -168 mm, was einer Abnahme von rund 17 % gegenüber der mittleren jährlichen Niederschlagssumme im Zeitraum 1961-1990 in der Höhe von 980 mm gleichkommt.

In der Abbildung 3 sind für die Trendgeradenlängen von 30, 40, 50 und 70 Jahren die mittleren jährlichen, klimawandelbedingten Niederschlagsänderungen, die durch die Geradensteigung quantifiziert wurden, dargestellt. Die Trendgeraden wurden ab 1881 gleitend mit einem jährlichen Versatz hin zur Gegenwart berechnet. Unabhängig von der verwendeten Trendgeradenlänge zeichnen sich positive und negative, Jahrzehnte andauernde (= multidekadische) Schwankungen der Niederschlagsänderung ab. Die negativsten Steigungswerte sind für alle gewählten Trendgeradenlängen in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts bis zur Gegenwart zu finden. Je kürzer die Trendgeradenlänge gewählt wird, desto größer wird der damit verbundene mittlere jährliche Niederschlagsrückgang.

Der stärkste mittlere, klimawandelbedingte Niederschlagsrückgang fand in Baden-Württemberg mit -6.5 mm/Jahr im Zeitraum 1993-2022 statt. Verfolgt man die Entwicklung der 30-jährigen Trendperiode weiter in die Vergangenheit zurück, dann lässt sich ableiten, dass Niederschlagsrückgänge auf dieser Zeitskala bereits seit den 1970er Jahren auftreten.

Die mit der 70-jährigen Trendperiode verbundenen Steigungswerte nehmen seit dem Beginn der 1940er Jahre ab und werden in den 1950er Jahren negativ (Periode 1953-2022: -0.3 mm/Jahr). Obwohl sich die 70-jährigen Steigungswerte Anfang des 20. Jahrhunderts auch der Nulllinie nähern, ist die Bedeutung der damaligen nicht mit der aktuellen Steigungswertentwicklung vergleichbar, weil sie bei deutlich geringeren Lufttemperaturwerten und daran gekoppelten Verdunstungsraten stattfand.

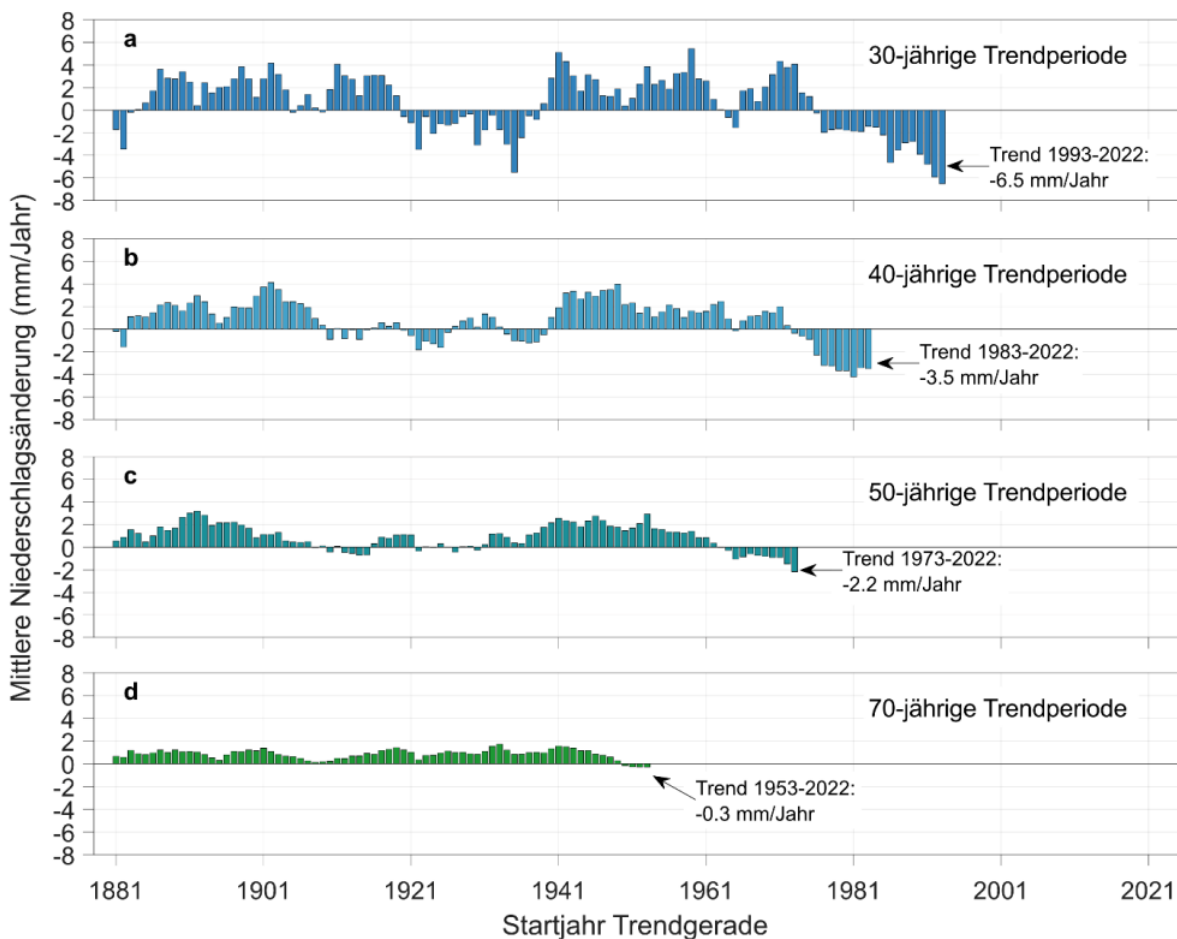


Abbildung 3: Mittlere jährliche klimawandelbedingte Gebietsniederschlagsänderung (mm/Jahr) in Baden-Württemberg im Zeitraum 1881-2022, quantifiziert durch die Steigung von gleitend berechneten Trendgeraden über (a) 30-jährige, (b) 40-jährige, (c) 50-jährige und (d) 70-jährige Perioden.

Dass ein langfristiger Rückgang der mittleren jährlichen Gebietsniederschlagssummen in Baden-Württemberg hin zur Gegenwart stattfindet, lässt sich ebenfalls mit den Ergebnissen, die in der Abbildung 4 zu sehen sind, veranschaulichen. Die blaue, gepunktete Linie gibt die 113 Steigungswerte von Trendgeraden wieder, die mit den Startjahren 1881 (142 jährliche Gebietsniederschlagswerte) bis 1993 (30 jährliche Gebietsniederschlagswerte) jeweils bis 2022 berechnet wurden. Es ist ersichtlich, dass die Steigungswerte der kürzesten Trendgeraden am stärksten von der Nulllinie abweichen und langfristige, mittlere Niederschlagsänderungswerte von -6.5 mm/Jahr für den Zeitraum 1993-2022 aufweisen.

Die Trendgeradenlängen, bei denen die Steigungswerte signifikant sind, weisen einen grünen Punkt auf. Zur Unterdrückung von mehrjährigen Schwankungen und zur besseren Beurteilung der Langfristigkeit der Steigungswertänderungen wird eine Exponentialfunktion zweiten Grades an die 113 jährlichen Steigungswerte angenähert (rote, gestrichelte Linie). Mit dem Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) wird die Varianzerklärung dieser Ausgleichskurve quantifiziert. Der hohe Wert des Bestimmtheitsmaßes von  $R^2 = 0.99$  deutet eine sehr hohe Varianzerklärung durch die Ausgleichskurve an.

Für eine zeitunabhängige, statistische Einordnung der Trendgeradensteigungswerte im Untersuchungszeitraum wurde eine logistische Verteilungsfunktion an alle jährlichen Gebietsniederschlagssummen angepasst. Die Anpassungsgüte der Verteilungsfunktion wurde mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test [5,6] für zwei Stichproben überprüft (Signifikanzniveau  $\alpha = 0.05$ ). Nach der Anpassung der logistischen Verteilungsfunktion wurde eine Monte-Carlo-Simulation der Niederschlagswerte im Untersuchungszeitraum mit 10 000 Wiederholungen durchgeführt, um Aussagen über die Streubreite der Steigungswerte in Abhängigkeit der Trendgeradenlänge treffen zu können. Dafür wurden für jede Wiederholung die Steigungswerte für alle 113 untersuchten Trendgeradenlängen berechnet. Über die aus der Monte-Carlo-Simulation für alle Trendgeradenlängen jeweils resultierenden 10 000 Steigungswerte wurde die Streubreite mit der ein- bis dreifachen Standardabweichung (SD) charakterisiert. Da die simulierten Steigungswerte für alle Trendgeradenlängen normalverteilt (Kolmogorov-Smirnov-Test, Signifikanzniveau  $\alpha = 0.05$ ) waren, befinden sich rund 68 % der Steigungswerte im Intervall von der Breite von einer Standardabweichung (ein positives und ein negatives Intervall, 1 SD) um die Nulllinie. Rund 95 % aller Steigungswerte befinden sich im Intervall von der Breite von zwei Standardabweichungen (zwei positive und zwei negative Intervalle, 2 SD) um die Nulllinie.

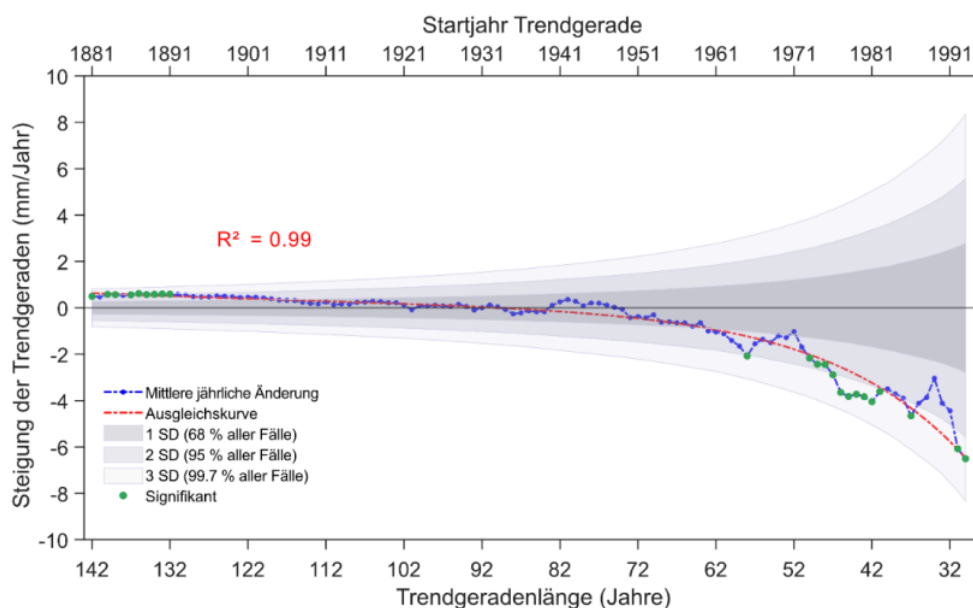


Abbildung 4: Steigung von Trendgeraden (blaue, gepunktete Linie) mit Längen von 142 bis 30 Jahren im Zeitraum 1881-2022. Trendgeradenlängen, mit denen eine signifikante Steigung verbunden ist, sind mit einem grünen Punkt gekennzeichnet. Die Langfristigkeit der Trendgeradensteigungsänderung wird mit einer Ausgleichskurve (rote, gestrichelte Linie) angenähert, die auf der Grundlage einer Exponentialfunktion zweiten Grades berechnet wurde. Die grauen Flächen geben die zeitunabhängige Streubreite der Trendgeradensteigungswerte als einfache (1 SD, in beide Richtungen von der Nulllinie aus), zweifache (2 SD) und dreifache (3 SD) Standardabweichung für die untersuchten Trendgeradenlängen an.

Bei der Verwendung der dreifachen Standardabweichung befinden sich 99,7 % aller Steigungswerte im dargestellten Intervall (drei positive und drei negative Intervalle, 3 SD) um die Nulllinie. Die Streubreite der zeitunabhängig simulierten Steigungswerte nimmt mit kürzer werdenden Trendgeraden zu. Die größten Streubreiten werden für die kürzesten Trendgeraden mit einer Länge von 30 Jahren berechnet.

Auffällig ist, dass die jährlichen Steigungswerte in den ersten 24 Jahren bis zur einer Trendgeradenlänge von 119 Jahren, die mit dem Startjahr 1904 verbunden ist, die höchsten positiven Werte aufweisen. Die Werte liegen alle weit entfernt von der Nulllinie im 2 SD- und 3 SD-Bereich und sind vielfach signifikant. Danach verringern sich die Steigungswerte mit kürzer werdender Trendgeradenlänge bis zur Nulllinie. Die Nulllinie wird durch die Ausgleichskurve bei einer Trendgeradenlänge von 89 Jahren im Jahr 1934 geschnitten. Für alle kürzeren Trendgeradenlängen sind die Ausgleichskurvenwerte negativ. Ab einer Trendgeradenlänge von 63 Jahren, die mit dem Startjahr 1960 verbunden ist, haben sich die Steigungswerte um mindestens 1 SD von der Nulllinie entfernt und sind damit deutlich negativer als in den Jahrzehnten zuvor. Alle folgenden Trendgeradenlängen führen zu negativen Steigungswerten, die sich in Richtung Gegenwart immer weiter von der Nulllinie entfernen und im 2 SD- und 3 SD-Bereich liegen.

Im Startjahr 1965 wird bei einer Trendgeradenlänge von 58 Jahren erstmals ein signifikanter langfristiger Rückgang der Jahresniederschlagssummen identifiziert. Ab einer Trendgeradenlänge von 52 Jahren, die mit dem Startjahr 1971 beginnt, sind die Steigungswerte vielfach signifikant negativ. Trotz eines kurzen, mehrjährigen Anstiegs der Steigungswerte bei Trendgeradenlängen von 36 bis 34 Jahren, treten die negativsten Steigungswerte bei den kürzesten Trendgeraden auf.

Es wird damit sichtbar, dass sich bei der langfristigen Niederschlagsentwicklung im Untersuchungszeitraum das Vorzeichen von Trendgeraden, die zur Abschätzung des Klimawandeleinflusses herangezogen werden, ändert. Die nicht signifikante Vorzeichenänderung tritt entlang der Ausgleichskurve im Jahr 1934 bei einer Trendgeradenlänge von 89 Jahren ein. Mindestens seitdem ist die langfristige Niederschlagsentwicklung entlang der Ausgleichskurve in Baden-Württemberg, wenn auch nicht durchgängig statistisch signifikant, rückläufig. Die stärksten mittleren jährlichen Niederschlagsrückgänge sind seit rund 40 Jahren zu verzeichnen.

### 3.2 Jahreszeitliche Niederschläge

Da neben der langfristigen Entwicklung der jährlichen Niederschlagssummen auch die langfristige Entwicklung der Verteilung der Niederschläge innerhalb eines Jahres eine enorme Bedeutung für die Verfügbarkeit von Wasser hat, sind in der Abbildung 5 die jahreszeitlichen Niederschlagssummen von 1881 bis 2022 im Winter (Dezember, Januar, Februar), Frühling (März, April, Mai), Sommer (Juni, Juli, August) und Herbst (September, Oktober, November) veranschaulicht.

In den Jahreszeiten verläuft die langfristige Niederschlagsentwicklung unterschiedlich, was sich durch deren mittlere 10-jährige Änderungsrate offenbart. Eine signifikante Zunahme der Niederschlagsmenge entlang der dargestellten Trendgeraden kann im Winter nur für die Zeiträume 1881-2022 und 1921-2022 festgestellt werden. In den beiden kürzeren Zeiträumen 1951-2022 und 1981-2022 sind die veranschaulichten Veränderungen nicht signifikant. Im Frühling treten aufgrund der sehr hohen Jahr-zu-Jahr-Variabilität (= interannuelle Variabilität) keine signifikanten Veränderungen der Niederschlagsmenge auf, obwohl die über 1981-2022 eingezeichnete Trendgerade eine deutliche Abnahme der Niederschlagssummen anzeigt. Im Sommer nimmt die

Niederschlagsmenge im Zeitraum 1951-2022 signifikant ab. In den anderen Zeiträumen sind die über die Trendgeraden abgebildeten langfristigen Niederschlagsveränderungen nicht signifikant. Im Herbst treten keine signifikanten langfristigen Niederschlagsveränderungen auf, obwohl auch hier die über 1981-2022 eingezeichnete Trendgerade eine deutliche Abnahme der Niederschlagssummen anzeigt.

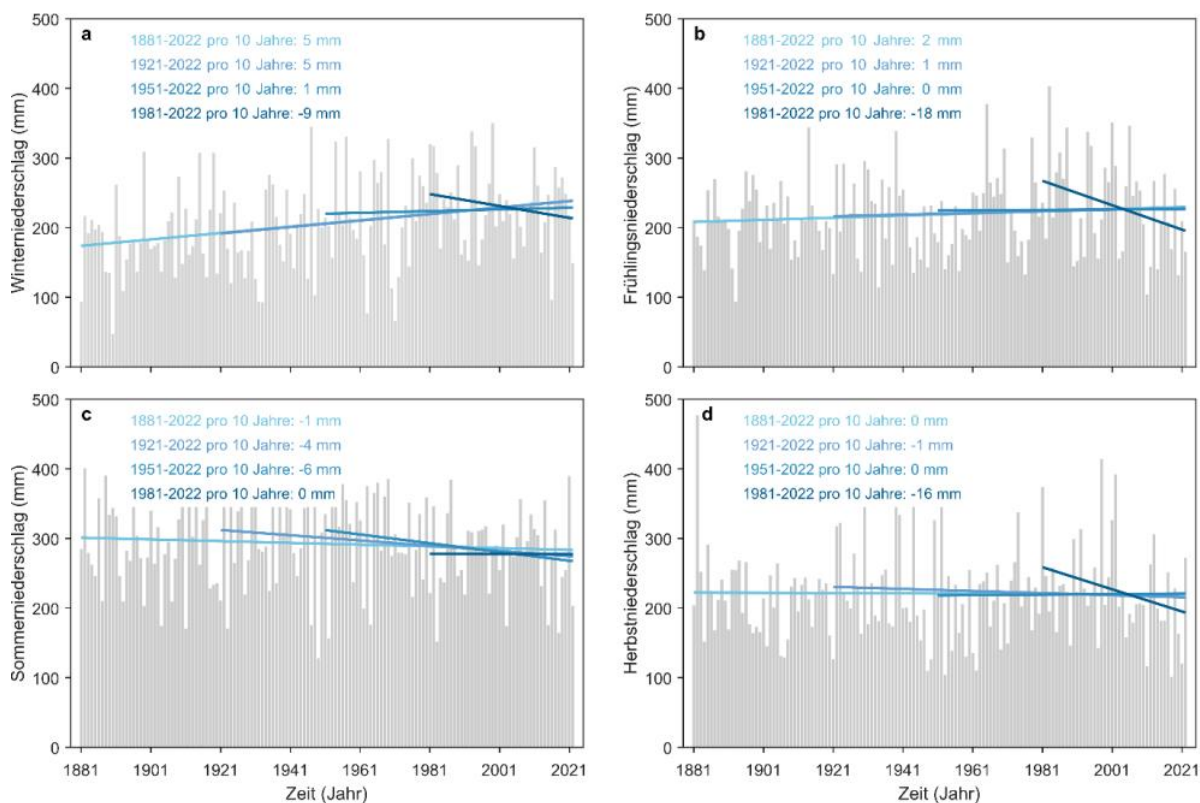


Abbildung 5: Jahreszeitliche Summen des mittleren Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg im Zeitraum 1881-2022 (graue Säulen). Die in unterschiedlichen Blautönen eingefärbten Trendgeraden kennzeichnen die langfristige Änderung der Gebietsniederschlagssumme im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Herbst in den Zeiträumen 1881-2022, 1921-2022, 1951-2022 und 1981-2022.

In der Abbildung 6 werden für 30- und 70-jährige Trendperioden die mittleren jahreszeitlichen, langfristigen Niederschlagsänderungen, präsentiert. Die Trendgeraden wurden für jede Jahreszeit ab 1881 mit einem jährlichen Versatz gleitend hin zur Gegenwart berechnet. Auf die Darstellung der jahreszeitlichen Niederschlagsentwicklung unter der Annahme von 40- und 50-jährigen Trendperioden wurde verzichtet, weil aus deren Verwendung grundsätzlich keine anderen als die gezeigten Ergebnisse resultieren.

Die langfristigen Entwicklungen der mittleren 30- und 70-jährigen jahreszeitlichen Niederschlagstrendwerte weisen im Untersuchungszeitraum positive und negative, Jahrzehnte andauernde Schwankungen auf. Ihre Ausprägung verläuft allerdings nicht über die Jahreszeiten hinweg synchron. In der Summe ergeben sich für die 30-jährigen Trendwerte ab den 1970er Jahren die größten negativen Abweichungen von der Nulllinie, die sich zu den in der Abbildung 3 dargestellten mittleren 30-jährigen Jahresniederschlagstrendwerten summieren. Die 70-jährigen Niederschlagstrendwerte nehmen in allen Jahreszeiten spätestens seit den 1950er Jahren ab. Das

deutet einen bereits Jahrzehnte andauernden Rückgang der Gebietsmittelwerte des jahreszeitlichen Niederschlags in Baden-Württemberg an.

Dass, in Analogie zu den jährlichen Gebietsniederschlagssummen, auch der langfristige Rückgang der jahreszeitlichen Niederschlagssummen bis zum Jahr 2022 auffällig ist, lässt sich ebenfalls mit den Ergebnissen, die in der Abbildung 7 zur Veränderung der Steigung von Trendgeraden (blaue, gepunktete Linie) mit einer Länge von 142 bis 30 Jahren dargestellt sind, kennzeichnen. Die Trendgeradenlängen, die eine signifikante Steigung aufweisen, sind mit einem grünen Punkt markiert. Die Langfristigkeit der Steigungswertänderungen wird im Winter, Frühling und Herbst mit einer Exponentialfunktion zweiten Grades angenähert (rote, gestrichelte Linie). Im Sommer wird die Langfristigkeit der Steigungswertänderungen durch eine Sinussummenfunktion vierter Ordnung angenähert, weil die Steigungswerte, nicht wie in den drei anderen Jahreszeiten, langfristig kontinuierlich abnehmen, sondern in den 1970er und 1980er Jahren wieder ansteigen. Mit Hilfe des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  wird die Varianzklärung der Ausgleichskurven quantifiziert.

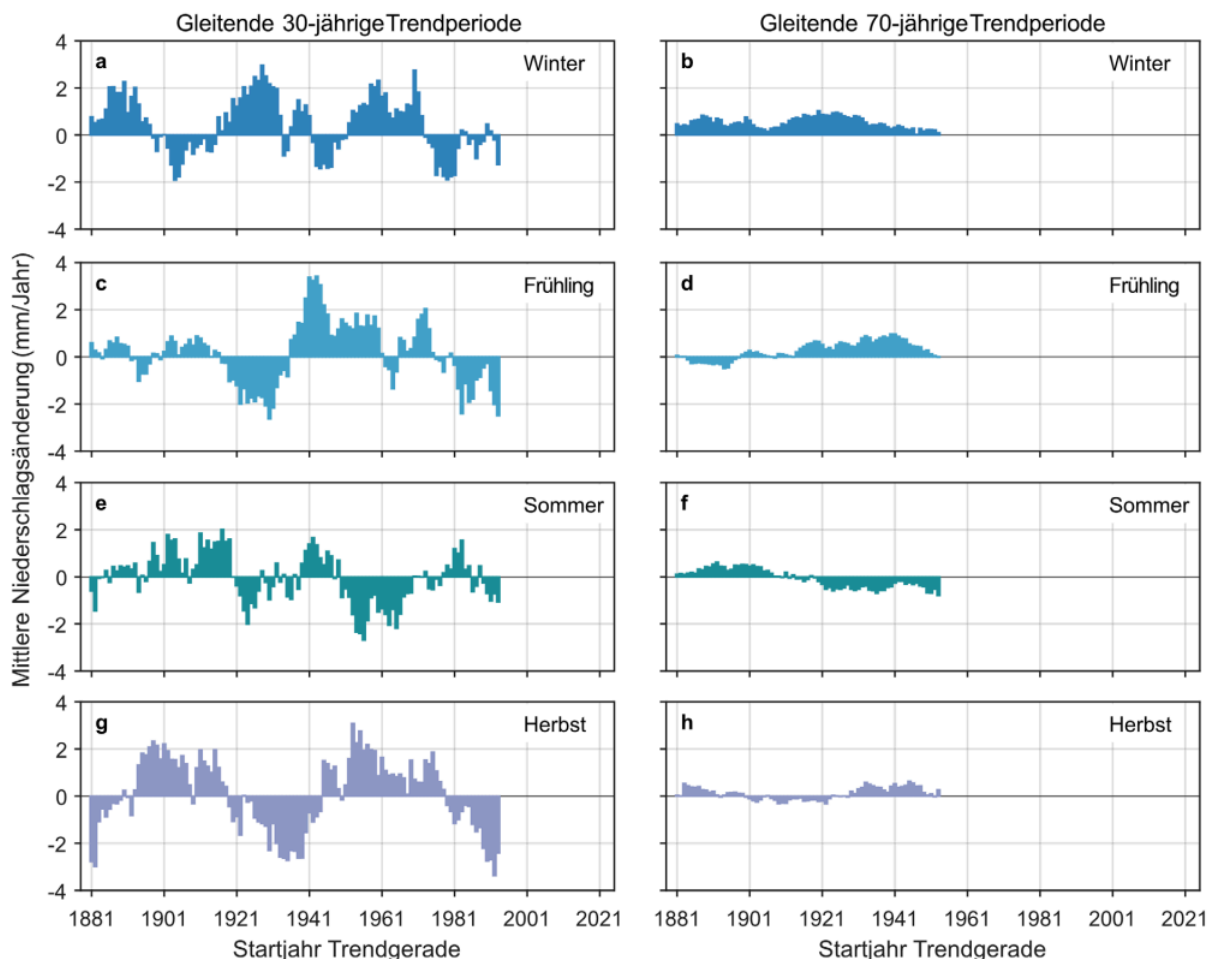


Abbildung 6: Mittlere 30- und 70-jährige langfristige Gebietsniederschlagsänderung (mm/Jahr) in Baden-Württemberg im Zeitraum 1881-2022, quantifiziert durch die Steigung von gleitend berechneten Trendgeraden für die Jahreszeiten (a,b) Winter, (c,d) Frühling, (e,f) Sommer und (g,h) Herbst.

In allen Jahreszeiten gibt es eine Tendenz zum Rückgang der Steigungswerte über den untersuchten Trendgeradenlängenbereich. Im Winter, Frühling und Herbst ändern sich langfristig

die Vorzeichen der Steigungswerte. In den ersten Jahrzehnten des Untersuchungszeitraums sind die Steigungswerte noch durchweg positiv. In den letzten Jahrzehnten des Untersuchungszeitraums sind die Vorzeichen dann alle samt negativ. Auch wenn der Rückgang im Frühling und Herbst nur sehr selten signifikant ist, so ist er über den gesamten untersuchten Trendgeradenlängenbereich kontinuierlich, was durch die hohe Varianzerklärung der Ausgleichskurven dokumentiert wird.

Im Herbst schneiden die Steigungswerte bereits zu Beginn der 1940er Jahre die Nulllinie und werden langfristig negativer. Im Frühling wird die Nulllinie Anfang der 1950er Jahre geschnitten. Ab diesem Zeitraum werden die Steigungswerte kontinuierlich negativer. Mit dem Beginn der 1970er Jahre erreicht die Abnahme der Steigungswerte in beiden Jahreszeiten den 2 SD-Bereich, womit ein sehr großer Abstand zur Nulllinie verbunden ist. Bei den kürzesten Trendgeradenlängen, die Anfang der 1990er Jahre erreicht werden, kommen die negativen Steigungswerte sogar an den 3 SD-Bereich heran.

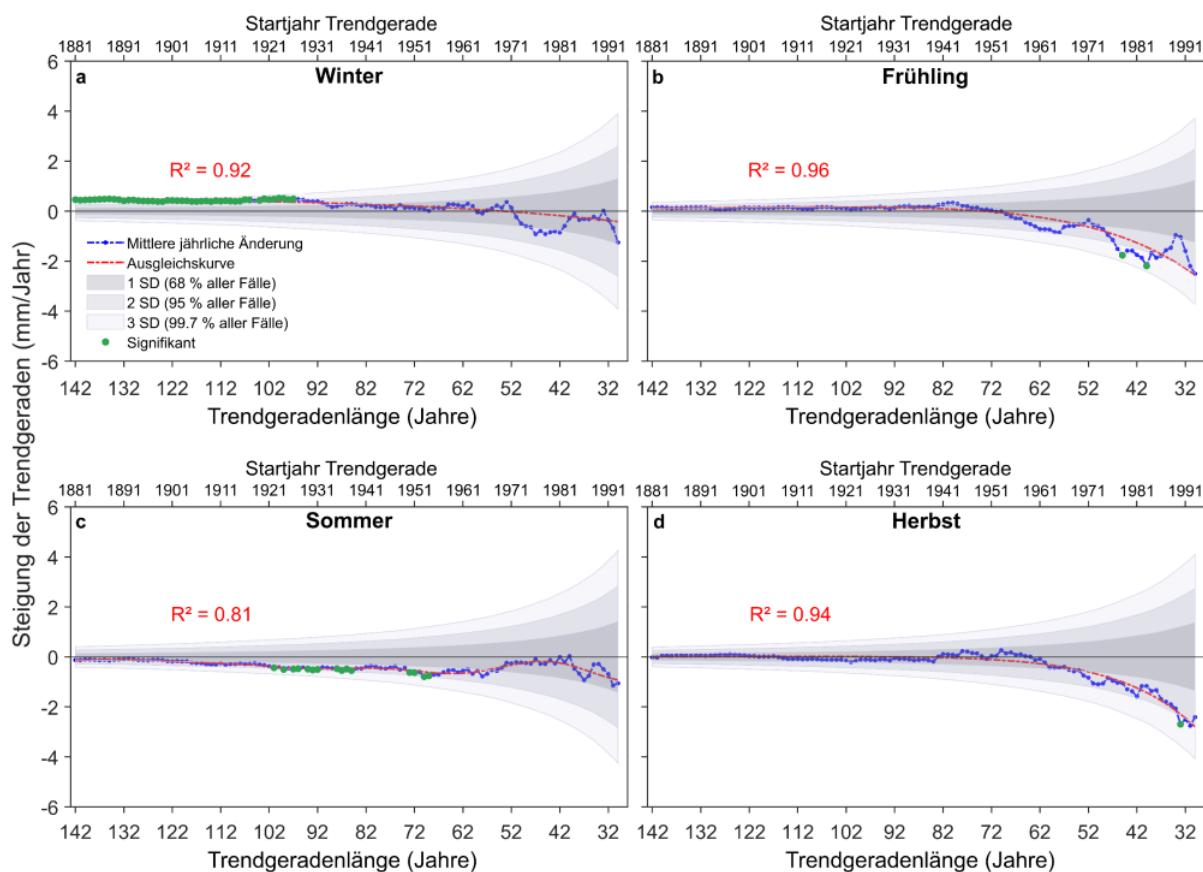


Abbildung 7: Steigung von Trendgeraden (blaue, gepunktete Linie) mit Längen von 142 bis 30 Jahren im Zeitraum 1881-2022 in den Jahreszeiten (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Herbst. Trendgeradenlängen, mit denen eine signifikante Geradensteigung verbunden ist, sind mit einem grünen Punkt gekennzeichnet. Die Langfristigkeit der Trendgeradensteigungsänderung wird mit einer Ausgleichskurve (rote, gestrichelte Linie) angenähert, die auf der Grundlage einer Exponentialfunktion zweiten Grades (Ausnahme Sommer: Sinussummenfunktion 4. Grades) berechnet wurde. Die grauen Flächen geben die Streubreite der Trendgeradensteigungswerte als einfache (1 SD, in beide Richtungen von der Nulllinie aus), zweifache (2 SD) und dreifache (3 SD) Standardabweichung für die untersuchten Trendgeradenlängen an.

Im Winter kann eine signifikante Zunahme der jahreszeitlichen Niederschlagssummen unterstellt werden, wenn man für die Quantifizierung der langfristigen Änderungen Trendgeradenlängen von

142 bis 97 Jahren zugrunde legt, welche mit den Startjahren 1881 bis 1926 verbunden sind. Bei der Verwendung von kürzeren Trendgeraden, die zu späteren Zeitpunkten beginnen, sind die positiven Steigungswerte nicht mehr signifikant. Zu Beginn der 1970er Jahre schneidet die Ausgleichskurve die Nulllinie. Danach werden die Steigungswerte entlang der Ausgleichskurve bis zum Jahr 2022 durchgängig negativer.

Im Sommer sind die Steigungswerte mit Ausnahme der Trendgeradenlänge von 40 Jahren, die für den Zeitraum 1983-2022 berechnet wurde, negativ. Wird das Startjahr von Trendgeraden in den 1920er bis 1950er Jahren gewählt, ist die Abnahme der sommerlichen Niederschläge vielfach signifikant. Danach nehmen die sommerlichen Niederschläge zwar immer noch ab, aber die Abnahme erfolgt nicht kontinuierlich bis zur kürzesten Trendgeradenlänge. In den 1970er und 1980er Jahren reduzieren sich die mittleren Abnahmeraten mehrfach, um dann bei den kürzesten Trendgeradenlängen Mitte der 1980er und Anfang der 1990er Jahre wieder größer zu werden.

### **3.3 Zusammenfassung der Niederschlagsentwicklung von 1881 bis 2022**

Aus den Ergebnissen, die auf der Grundlage der vom DWD zur Verfügung gestellten Gebietsmittelwerte des Niederschlags erzielt wurden, lässt sich ableiten, dass das langfristige jährliche Wasserdargebot aus der Atmosphäre in Baden-Württemberg seit mehreren Jahrzehnten zurückgeht. Der Rückgang der Jahresniederschlagssummen ist in Abhängigkeit der verwendeten Trendgeradenlängen trotz mehrjähriger Schwankungen vielfach signifikant. Dies gilt insbesondere für die starken Rückgänge in den vergangenen vier Jahrzehnten. Der Rückgang der jährlichen Niederschlagssummen führt zusammen mit dem starken klimawandelbedingten Anstieg der Lufttemperatur und Verdunstung zur abnehmenden Wasserverfügbarkeit an der Erdoberfläche, zu einer deutlichen Verringerung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag [7] sowie zu einer erhöhten trockenstressbedingten Baumsterblichkeit im Schwarzwald [8].

Die langfristig rückläufige Tendenz der Jahresniederschlagssummen bildet sich, zu unterschiedlichen Anteilen, in allen Jahreszeiten ab. Die Aussage, dass die Niederschlagssummen im Winter seit 1881 signifikant angestiegen sind, kann nur bei der Verwendung von Trendgeradenlängen größer als 96 Jahre getroffen werden. Bei kürzeren Trendgeradenlängen ist der Anstieg der Winterniederschläge nicht mehr signifikant.

Eine weitere Komponente des Wasserdargebots aus der Atmosphäre, die nur eingeschränkt zur Aufrechterhaltung der Wasserverfügbarkeit beiträgt, sind Starkniederschläge. Die Starkniederschlagsentwicklung wurde in diesem Kurzpapier zwar nicht untersucht, grundsätzliche Aussagen im Zusammenhang mit dem rückläufigen Wasserdargebot aus der Atmosphäre lassen sich dennoch von anderen Untersuchungen auf Baden-Württemberg übertragen.

Durch ihre hohe Intensität tragen lokal auftretende Starkniederschläge nur eingeschränkt zur Aufrechterhaltung der erdoberflächennahen Wasserverfügbarkeit bei, da sie zu großen Teilen nicht im Boden versickern können. Deshalb fließen sie rasch oberflächlich und unwiederbringlich ab. Obwohl davon ausgegangen wird, dass es durch den menschengemachten Klimawandel häufiger zu Starkniederschlagsereignissen kommt [9-11], wird gegenwärtig für Deutschland noch diskutiert,



ob im Gebietsmittel eindeutige klimawandelbedingte Veränderungen der Verteilung und Häufigkeit von Starkniederschlagsereignissen feststellbar sind [12-14].

## 4. Modellwertbasierte Niederschlagsentwicklung von 1950 bis 2099

Der Klima-Sachverständigenrat möchte die Landesregierung bezüglich der erforderlichen Maßnahmen zur Klimawandelanpassung adäquat beraten und setzt sich daher mit der Niederschlagsentwicklung intensiv auseinander. Gerade die in den kürzeren Zeitperioden der jüngeren Vergangenheit zu beobachtende Trendumkehr hin zu deutlich rückläufigen Niederschlagsmengen erscheinen alarmierend und müssen in die Analyse der zukünftigen Entwicklungen einbezogen werden.

Daher wurde, um Aussagen über die zukünftige Entwicklung des mittleren Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg treffen zu können, ein Vergleich zwischen den DWD-Gebietsmittelwerten, die auf Niederschlagsmessungen beruhen, und Klimamodellergebnissen durchgeführt. Die Modellergebnisse stammen von Ensembles der für Baden-Württemberg verfügbaren regionalen EURO-CORDEX- [15] und ReKliEs-De-Modelle [16] und 20 globaler Klimamodelle, die im *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP) miteinander verglichen wurden [17].

In diesem Kurzpapier werden Modellergebnisse, die im Rahmen der sechsten CMIP-Phase (CMIP6) erzielt wurden, verwendet. In die Berechnung des Gebietsniederschlagsmittelwertes wurden alle Werte, die in den untersuchten Modellrastern in Baden-Württemberg liegen, entsprechend ihrem Flächenanteil gewichtet, einbezogen. Die verfügbaren EURO-CORDEX-Modellwerte lassen einen Vergleich der vergangenen mittleren Niederschlagsentwicklung mit DWD-Gebietsmittelwerten im Zeitraum 1970-2022 zu. Für frühere Zeiträume liegen keine Werte vor. Daten der CMIP6-Modelle ermöglichen Vergleiche der vergangenen Niederschlagsentwicklung im Zeitraum 1950-2022.

Die im Rahmen der EURO-CORDEX-Initiative erzielten Modellergebnisse basieren auf den globalen Klimaszenarien *Representative Concentration Pathways* (RCP), die einen mittleren globalen Strahlungsantrieb am Ende des 21. Jahrhunderts von 4.5 W/m<sup>2</sup> (RCP 4.5) und 8.5 W/m<sup>2</sup> (RCP 8.5) unterstellen. Grundsätzlich gelten Klimaszenarien mit einem niedrigeren Strahlungsantriebswert als günstiger für die Klimaerhaltung. Sollte sich das zukünftige Klima gemäß den Szenarien, denen ein Strahlungsantrieb von 8.5 W/m<sup>2</sup> unterstellt wird, entwickeln, sind schwerwiegende Auswirkungen auf das menschliche Leben im Allgemeinen und das Leben in Baden-Württemberg zu erwarten. Gleichzeitig reduziert sich der Spielraum, sich an die immer weniger beherrschbaren Klimaveränderungen anzupassen.

Die RCP-Szenarien wurden im Rahmen des IPCC-Prozesses mittlerweile durch einen neuen Satz von Szenarienrechnungen (*Shared Socioeconomic Pathways*, SSP) ersetzt [18]. Aus diesem Grund wurden die DWD-Gebietsmittelwerte ebenfalls mit den SSP-basierten Simulationsergebnissen verglichen. Da die Regionalisierung der SSP-Szenarien für Deutschland noch aussteht, wurden die Globalmodellergebnisse für Baden-Württemberg direkt analysiert. Die Regionalisierung und die damit verbundene Validierung der CMIP6-Globalmodellergebnisse für Deutschland wird wahrscheinlich noch mehrere Jahre in Anspruch nehmen. Die validierten

Regionalmodellergebnisse stünden damit erst sehr kurz vor 2030 zur Verfügung, dem Jahr, in dem Baden-Württemberg gemäß dem KlimaG BW wichtige Klimaschutzziele erreicht haben muss [19].

Zur Einschätzung, ob die untersuchten Mess- und Modelldaten die gleiche Verteilung aufweisen, wurde der nicht-parametrische Kruskal-Wallis-Test [20] angewendet (Signifikanzniveau  $\alpha = 0.01$ ). Mit dem Test wurden die Mediane der Trends in den Messdaten, den mittleren Modelldaten und den Daten aller Klimamodelle einzeln berechnet und verglichen. Der Medianvergleich gibt Aufschluss darüber, ob die Trends vergleichbare jährliche und jahreszeitliche Niederschlagssummen abbilden. Die Klimamodelltrends, deren mittlere Ränge sich signifikant vom Trend der DWD-Gebietsmittelwerte unterscheiden, wurden mit dem Tukey-Kramer post-hoc Test (Signifikanzniveau  $\alpha = 0.05$ ) identifiziert [21]. Ob die Trends gleichsinnig und positiv linear zusammenhängen, wurde mit dem Pearson Korrelationskoeffizient getestet (Signifikanzniveau  $\alpha = 0.05$ ).

#### 4.1 Jahresniederschläge

Die Abbildung 8 stellt für einen mittleren globalen Strahlungsantriebswert von  $4.5 \text{ W/m}^2$  den Vergleich zwischen dem Trend der jährlichen DWD-Gebietsniederschlagsmittelwerte (blaue Linie) und den Trends mittlerer jährlicher Gebietsmittelwerte (rote Linie) von EURO-CORDEX- (RCP 4.5) und CMIP6-Modellen (SSP2-4.5) dar. Augenscheinlich ist die große Streuung der Modellwerte. Sie kann auf Jahresbasis mehrere Hundert Millimeter betragen und gegen das Ende des 21. Jahrhunderts zunehmen. Sie wird durch die ein-, zwei- und dreifache Standardabweichung gekennzeichnet (graue Flächen). Die Trends der Niederschlagsentwicklung wurden jeweils mit einem mittleren lokal gewichteten Regressionsmodell berechnet [22]. Lokal gewichtete Regressionsmodelle sind im Gegensatz zu Trendgeraden geeignet, um Klimaschwankungen nachzubilden [23].

Es ist ersichtlich, dass die mittleren Modelltrendwerte in den Vergleichszeiträumen betragsmäßig über den Trends der DWD-Gebietsmittelwerte liegen. Die Modelltrends verlaufen glatter und bilden multidekadische Schwankungen mit kleinerer Amplitude ab. Ab dem Jahr 2000 wird die Abweichung zwischen den auf Messwerten beruhenden DWD-Gebietsniederschlagstrends und den Modelltrends bis ins Jahr 2022 größer. Die Abweichungen erreichen dann, bezogen auf die EURO-CORDEX-Modellwerte, den Bereich der dreifachen und bezogen auf die CMIP6-Modellwerte, den Bereich der zweifachen Standardabweichung. Damit weicht die gegenwärtige Entwicklung der jährlichen DWD-Gebietsniederschlagstrends deutlich von den mittleren langfristigen modellierten Gebietsniederschlagsentwicklungen ab.

Während sich aus den DWD-Werten für die Zeiträume 1970-2022 und 1950-2022 ein langfristiger Rückgang des mittleren Gebietsniederschlags von  $-10 \%$  und  $-9 \%$  ergibt, beträgt die aus den mittleren EURO-CORDEX- und CMIP6-Modelltrends berechnete Gebietsniederschlagsänderung  $6 \%$  bzw.  $5 \%$ . Veranschaulichungen, die eine ähnliche Aussage zu den langfristigen Entwicklungen des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg zulassen, finden sich im Deutschen Klimaatlas, der durch den DWD online veröffentlicht wird [24]. Mit einem Kruskal-Wallis-Test kann gezeigt werden, dass sich die Mediane der Trends der jährlichen DWD-

Gebietsniederschlagswerte und mittleren Modellwerte in den Zeiträumen 1970-2022 (EURO-CORDEX-Modelldaten) und 1950-2022 (CMIP6-Modelldaten) in den Szenarien RCP 4.5 und SSP2-4.5 signifikant voneinander unterscheiden.

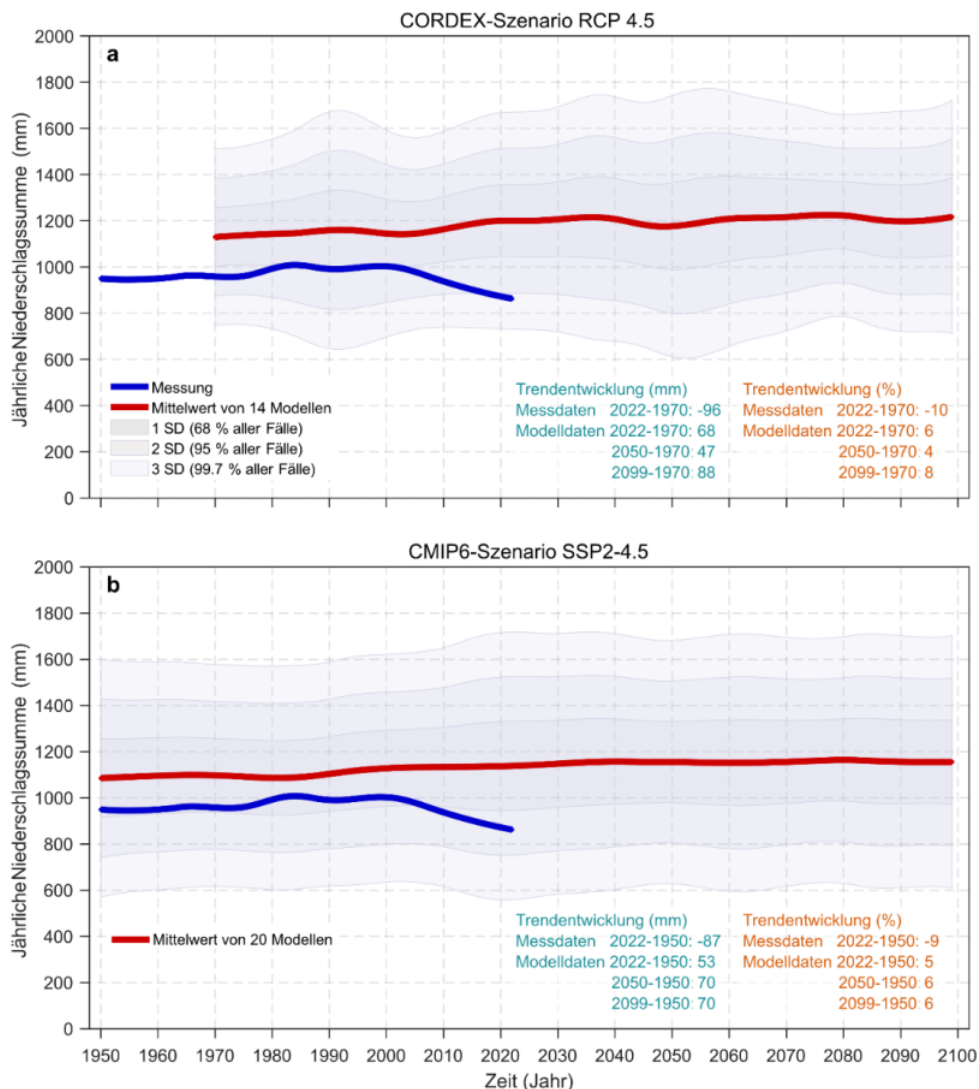


Abbildung 8: Vergleich von Trends zwischen DWD-Gebietsmittelwerten der jährlichen Niederschlagssumme, die auf Messungen beruhen, und mittleren (a) EURO-CORDEX- und (b) CMIP6-Modellwerten für Baden-Württemberg im Zeitraum 1950-2099. Den Modellwerten liegen Klimaszenarien zugrunde, in denen am Ende des 21. Jahrhunderts ein mittlerer globaler Strahlungsantriebswert von 4.5 W/m<sup>2</sup> unterstellt wird (RCP 4.5, SSP2-4.5). Die Trends für die 14 EURO-CORDEX- und 20 CMIP6-Modelle wurden für die mittleren langfristigen Gebietsniederschlagsentwicklungen berechnet. Die grauen Flächen kennzeichnen die einfache (1 SD), zweifache (2 SD) und dreifache (3 SD) Standardabweichung der jeweiligen Modellergebnisse. EURO-CORDEX-Modellwerte stehen ab 1970, CMIP6-Modellwerte ab 1950 zur Verfügung.

In der Abbildung 9 wird derselbe, auf Jahressummen des Gebietsniederschlags basierende Vergleich wie in der Abbildung 8 für den mittleren globalen Strahlungsantriebswert von 8.5 W/m<sup>2</sup> in den Szenarien RCP 8.5 und SSP5-8.5 dargestellt. Weitgehend können alle vorherigen, für den Strahlungsantrieb von 4.5 W/m<sup>2</sup> getroffenen Aussagen auf dieses ungünstige Klimaszenario übertragen werden: Die Trends der mittleren Modellwerte liegen durchweg über dem Trend der DWD-Gebietsmittelwerte. Die Abweichungen zwischen den Trends werden unabhängig vom verwendeten Modellensemble ebenfalls bis zum Jahr 2022 größer. Die relativen Trendänderungen

der Modelldaten betragen in den Zeiträumen 1970-2022 bzw. 1950-2022 jeweils 4 %. Die beiden verwendeten Modellensembles deuten damit sehr ähnliche Änderungen des Trends der mittleren Gebietsniederschlagswerte bis ins Jahr 2022 an.

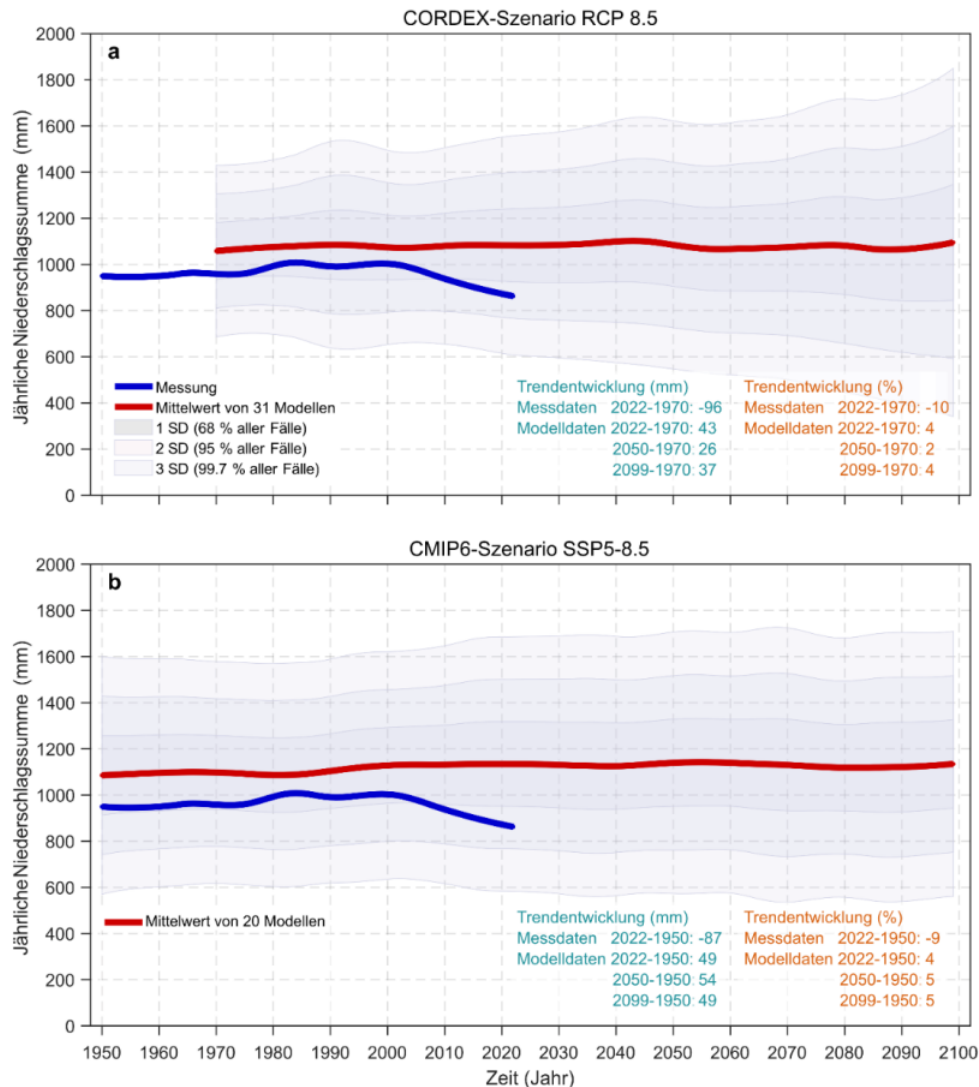


Abbildung 9: Vergleich von Trends zwischen DWD-Gebietsmittelwerten der jährlichen Niederschlagssumme, die auf Messungen beruhen, und mittleren (a) EURO-CORDEX- und (b) CMIP6-Modellwerten für Baden-Württemberg im Zeitraum 1950-2099. Den Modellwerten liegen Klimaszenarien zugrunde, in denen am Ende des 21. Jahrhunderts ein mittlerer globaler Strahlungsantriebswert von  $8.5 \text{ W/m}^2$  unterstellt wird (RCP 8.5, SSP5-8.5). Die Trends für die 31 EURO-CORDEX- und 20 CMIP6-Modelle wurden für die mittleren langfristigen Gebietsniederschlagsentwicklungen berechnet. Die grauen Flächen kennzeichnen die einfache (1 SD), zweifache (2 SD) und dreifache (3 SD) Standardabweichung der jeweiligen Modellergebnisse. EURO-CORDEX-Modellwerte stehen ab 1970, CMIP6-Modellwerte ab 1950 zur Verfügung.

Die Ergebnisse der Kruskal-Wallis- und Tukey-Kramer-Tests zeigen, dass sich die Mediane der Trends der jährlichen DWD-Gebietsniederschlagswerte und mittleren Modellwerte in den Zeiträumen 1970-2022 (EURO-CORDEX-Modelldaten) und 1950-2022 (CMIP6-Modelldaten) in den Szenarien RCP 8.5 und SSP5-8.5 signifikant voneinander unterscheiden.

Zwischen den Trends der DWD-Gebietsmittelwerte und den mittleren Klimamodellwerten besteht in Bezug auf die Jahresniederschlagssummen in den vergangenen Jahrzehnten eine geringe über den Kruskal-Wallis-Test und die Korrelationsanalyse quantifizierte Ähnlichkeit. Die Mediane der

Trends der mittleren jährlichen Klimamodellwerte weichen in allen untersuchten Kombinationen signifikant vom Median des Trends der DWD-Gebietsniederschlagsmittelwerte ab. Bis auf den Trend der mittleren EURO-CORDEX-Modellwerte im Szenario RCP 8.5 sind die Modelltrends zum Trend der DWD-Gebietsniederschlagsmittelwerte signifikant gegenläufig.

Vergleicht man die Trends der Simulationsergebnisse aller Klimamodelle einzeln mit dem DWD-Gebietsmittelwerten, dann sind über die unterstellten Klimaszenarien und Ensembles hinweg zwischen 0 % (RCP 4.5) und 19 % (RCP 8.5) der Modelltrends den Trends der mittleren DWD-Gebietsniederschlagssummen ähnlich.

Diese Ergebnisse werfen Fragen auf. Die Nutzung von Klimamodellen ist insbesondere für die Analyse der globalen Entwicklungsdynamiken des Klimawandels und entsprechende Schlussfolgerungen für Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsziele unerlässlich, bilden sie doch gerade die globalen Trends sehr zuverlässig ab. Die gezeigte starke Abweichung der regionalisierten Modellergebnisse von den erfassten Messdaten mit teilweise vollständig konträren Ergebnissen stellt die Tauglichkeit der Modelle als Grundlage für die Entwicklung regionaler, niederschlagsbezogener Klimawandelanpassungsstrategien allerdings in Frage.

## 4.2 Jahreszeitliche Niederschläge

Neben der langfristigen Entwicklung der jährlichen mittleren Gebietsniederschläge ist die Entwicklung der mittleren Gebietsniederschlagsverteilung innerhalb eines Jahres entscheidend für die Wasserverfügbarkeit. Aus diesem Grund werden in der Abbildung 10 die Trends der DWD-Gebietsmittelwerte mit den Trends der EURO-CORDEX- und CMIP6-Modelle in allen Jahreszeiten verglichen.

Die jahreszeitlichen Trends der DWD-Gebietsmittelwerte weisen ausgeprägte multidekadische Schwankungen auf, die in den Trends der mittleren Modellwerte verbunden mit den Klimaszenarien RCP 4.5 und SSP2-4.5 nur unzureichend nachgebildet werden. Die mit den DWD-Gebietsmittelwerten verbundenen Trendkurven liegen meistens unterhalb der Trendkurven der mittleren Modellwerte.

Während die Trends der auf Messdaten basierenden jahreszeitlichen DWD-Gebietsmittelwerte vor allem in den vergangenen 20 Jahren rückläufige Niederschlagsmengen ausweisen, variieren die Klimamodelltrends kaum und deuten für die Zukunft mehrfach eine Stagnation oder Zunahme der zukünftigen jahreszeitlichen Gebietsniederschlagsmengen an. Besonders stark weichen die Trendkurven im Winter, Frühling und Herbst, unabhängig vom Klimaszenario, voneinander ab. Die mit den DWD-Gebietsmittelwerten verbundenen Trendkurven reichen bis zum Jahr 2022 z. T. bis in den Bereich der dreifachen Standardabweichung der Modellwerte und liegen damit weit unterhalb der Trends der mittleren Klimamodellwerte. Die geringsten Abweichungen treten im Sommer auf.

Die mittlere jahreszeitliche Gebietsniederschlagsentwicklung in den Klimaszenarien RCP 8.5 und SSP5-8.5 unterscheidet sich nicht grundlegend von der mittleren jahreszeitlichen Entwicklung in den Szenarien RCP 4.5 und SSP2-4.5 (Abbildung 11). Zwar nähern sich die Trends der DWD-

Gebietsmittelwerte den Modelltrends betragsmäßig an, aber die Jahrzehnte andauernden Schwankungen in den DWD-Gebietsmittelwerten werden durch die Modelltrends nur unzureichend widerspiegelt. Im Winter, Frühling und Herbst erreichen die Trends der DWD-Gebietsmittelwerte bis zum Jahr 2022 die Bereiche der zwei- und dreifachen Standardabweichung.

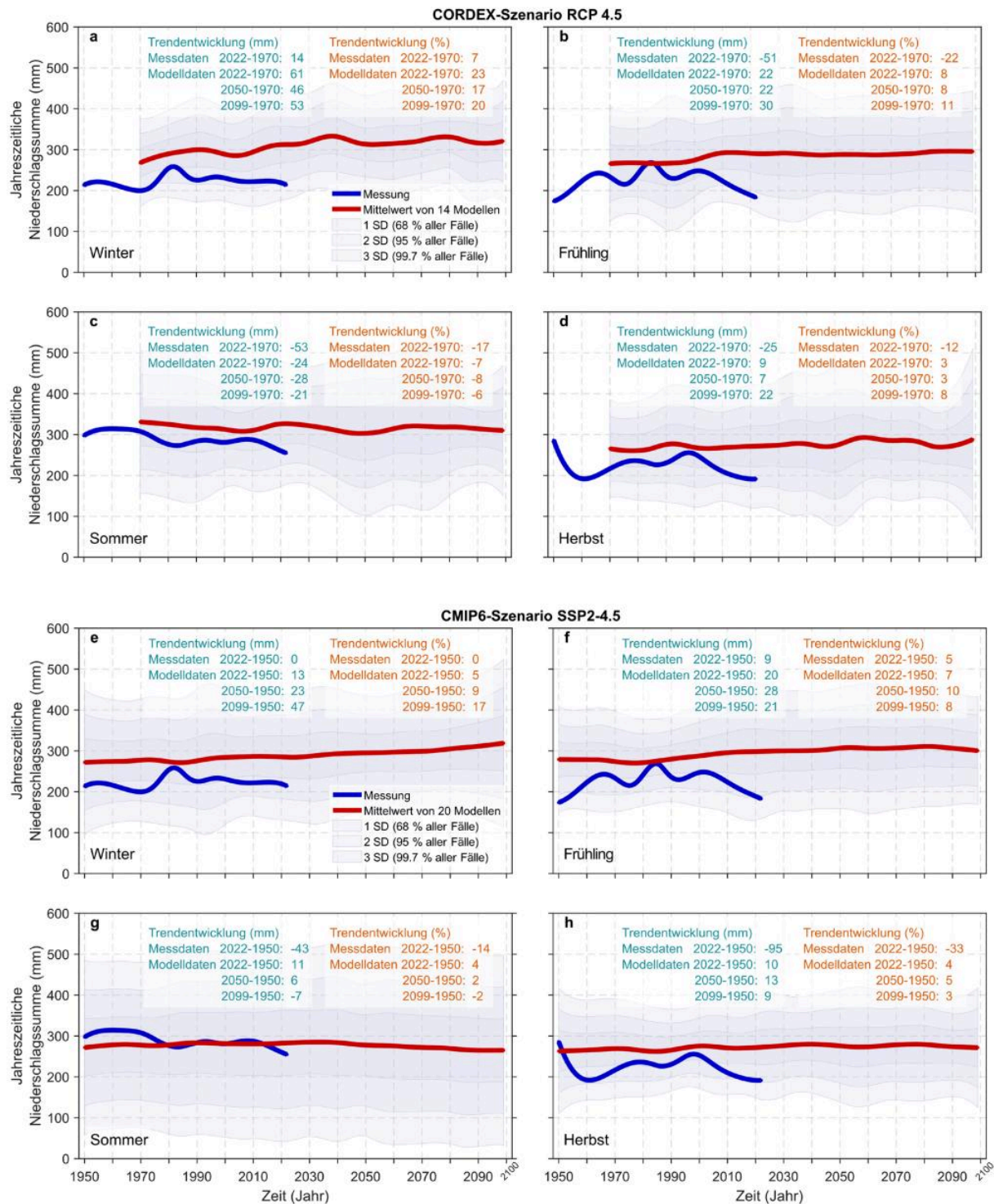


Abbildung 10: Vergleich von Trends zwischen DWD-Gebietsmittelwerten der jahreszeitlichen Niederschlagssumme und mittleren EURO-CORDEX- und CMIP6-Modellwerten für Baden-Württemberg im Zeitraum 1950-2099 im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Herbst. Den Modellwerten liegen Klimaszenarien zugrunde, in denen am Ende des 21. Jahrhunderts ein mittlerer globaler Strahlungsantriebswert von  $4.5 \text{ W/m}^2$  unterstellt wird (RCP 4.5, SSP2-4.5). Die Trends für die 14 EURO-CORDEX- und

20 CMIP6-Modelle wurden für die mittleren langfristigen Gebietsniederschlagsentwicklungen berechnet. Die grauen Flächen kennzeichnen die einfache (1 SD), zweifache (2 SD) und dreifache (3 SD) Standardabweichung der jeweiligen Modellergebnisse. EURO-CORDEX-Modellwerte stehen ab 1970, CMIP6-Modellwerte ab 1950 zur Verfügung.

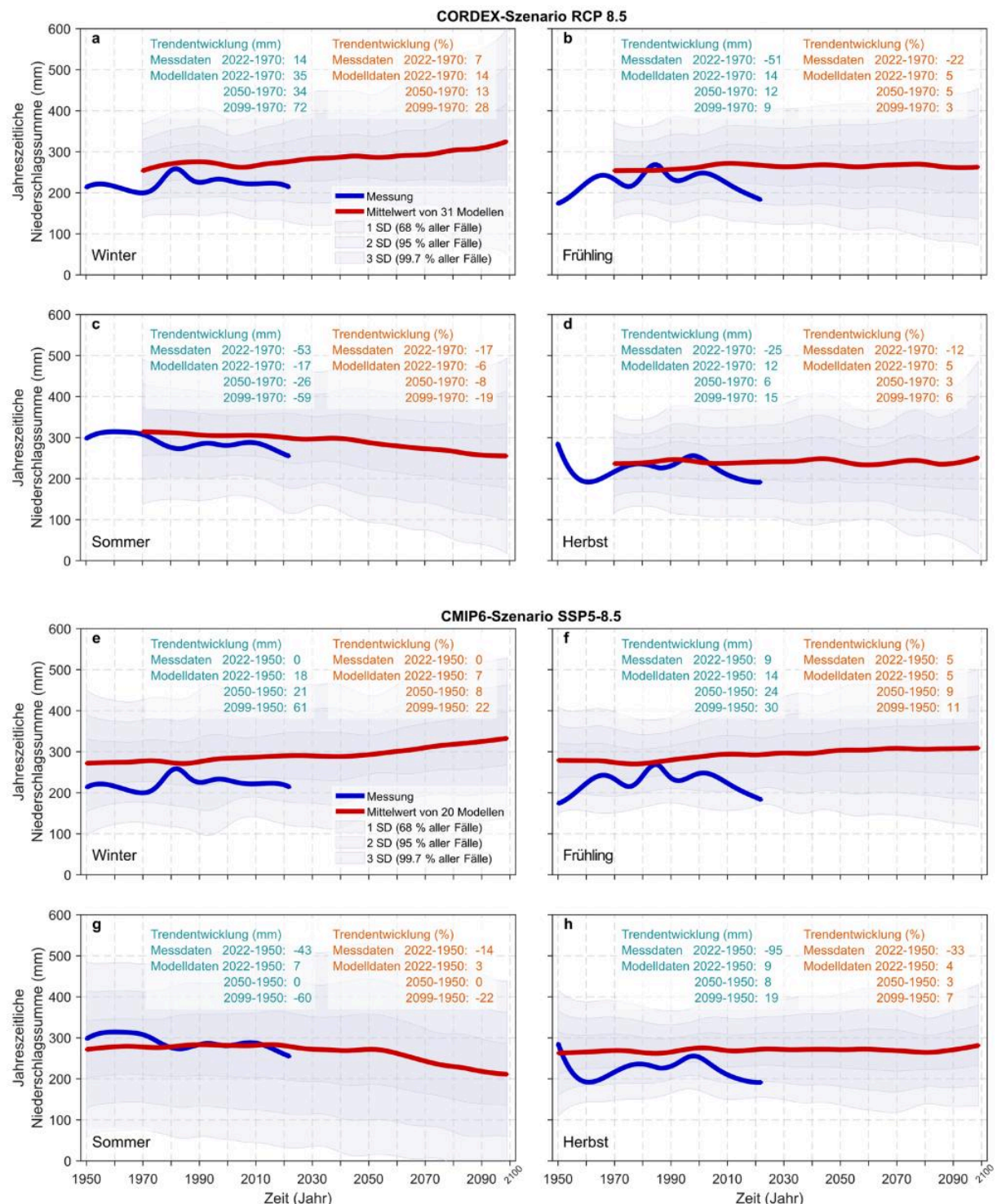


Abbildung 11: Vergleich von Trends zwischen DWD-Gebietsmittelwerten der jahreszeitlichen Niederschlagssumme und mittleren EURO-CORDEX- und CMIP6-Modellwerten für Baden-Württemberg im Zeitraum 1950-2099 im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Herbst. Den Modellwerten liegen Klimaszenarien zugrunde, in denen am Ende des 21. Jahrhunderts ein mittlerer globaler Strahlungsantriebswert von 8.5 W/m<sup>2</sup> unterstellt wird (RCP 8.5, SSP5-8.5). Die Trends für die 31 EURO-CORDEX- und 20 CMIP6-Modelle wurden für die mittleren langfristigen Gebietsniederschlagsentwicklungen berechnet. Die grauen Flächen



*kennzeichnen die einfache (1 SD), zweifache (2 SD) und dreifache (3 SD) Standardabweichung der jeweiligen Modellergebnisse. EURO-CORDEX-Modellwerte stehen ab 1970, CMIP6-Modellwerte ab 1950 zur Verfügung.*

Die Ergebnisse der Kruskal-Wallis- und Tukey-Kramer-Tests und der Korrelationsanalyse zeigen, dass sich die Mediane der Trends der jahreszeitlichen DWD-Gebietsniederschlagswerte und mittleren Modellwerte in den Zeiträumen 1970-2022 (EURO-CORDEX-Modelldaten) und 1950-2022 (CMIP6-Modelldaten) in allen Klimaszenarien signifikant voneinander unterscheiden. Die Trends der einzelnen Klimamodellwerte sind in allen Jahreszeiten und Kombinationen signifikant vom Median des Trends der DWD-Gebietsniederschlagsmittelwerte verschieden. Im Winter, Sommer und Herbst weist die Korrelation keine eindeutige Richtung auf. Im Frühling nimmt die jahreszeitliche Gebietsniederschlagssumme in beiden Klimaszenarien und Ensembles bis 2022 signifikant ab.

Vergleicht man die Trends der Simulationsergebnisse aller Klimamodelle einzeln mit den DWD-Gebietsmittelwerten, dann sind über die unterstellten Klimaszenarien und Ensembles hinweg zwischen 0 % (RCP 4.5, Winter und Frühling) und 19 % (RCP 8.5, Sommer) der Modelltrends den Trends der mittleren DWD-Gebietsniederschlagssummen ähnlich.

### **4.3 Zusammenfassung des Mess- mit Modellwertvergleichs von 1950 bis 2099**

Im Untersuchungszeitraum deuten die Trends der mittleren Klimamodellwerte unabhängig vom Ensemble und Klimaszenario eine langfristige Zunahme der jährlichen Gebietsniederschläge in Baden-Württemberg bis ans Ende des 21. Jahrhunderts an. Die mittleren relativen Änderungen gegenüber den Jahren 1970 und 1950, ab denen EURO-CORDEX- und CMIP6-Modellwerte vorliegen, beträgt in den Jahren 2050 und 2100 zwischen 2 % und 8 %. Die projizierte Zunahme des jährlichen Gebietsniederschlags kommt durch den jahreszeitlichen Anstieg im Winter, Frühling und Herbst zustande. Die Zunahme fällt im Winter mit 17 % bis 28 % am stärksten aus. Im Frühling (3 % bis 11 %) und Herbst (3 % bis 8 %) wird eine geringere Zunahme projiziert. Im Sommer ist auf der Grundlage der Trends der mittleren Modellwerte bis zum Ende des 21. Jahrhunderts mit einem Rückgang des Gebietsniederschlags von -2 % bis -22 % zu rechnen.

Im Zeitraum 1950-2022, für den sowohl DWD-Gebietsniederschlagsmittelwerte als auch Klimamodellwerte des Gebietsniederschlags vorliegen, bestehen über die untersuchten Modellensembles und Klimaszenarien hinweg signifikante Unterschiede. Die Klimamodellwerte weisen in den meisten Fällen höhere Niederschlagssummen auf und können Jahrzehnte andauernde Schwankungen nicht nachbilden. So weisen beispielsweise auf der Grundlage von lokal gewichteten Regressionsmodellen berechnete Trends der DWD-Gebietsniederschlagsmittelwerte seit dem Beginn des 21. Jahrhunderts bis ins Jahr 2022 vielfach deutlich geringere Werte auf als die Trends der mittleren Klimamodellwerte.

Da in den Abbildungen 8 bis 11 die Standardabweichung zur Veranschaulichung der Modelltrendstreuung verwendet wird, wird die Lage der einzelnen Modelltrends im Verhältnis zu den Trends, die mit den DWD-Gebietsmittelwerten verbunden sind, unscharf wiedergegeben. Deshalb wird in der Abbildung 12 ein Überblick über alle vergangenen Trendabweichungen der DWD-Gebietsmittelwerte von den Trends der Modellwerte präsentiert. Bis auf wenige Ausnahmen

sind die Trendwerte verbunden mit den DWD-Gebietsmittelwerten (blaue Punkte) geringer als die Trendwerte der mittleren Modellwerte (rote Punkte). Die Streuung der einzelnen Modellwerte wird durch die grauen Punkte aufgezeigt. Vergleicht man die Lage der blauen Punkte mit der Verteilung der grauen Punkte, dann wird evident, dass sich die blauen Punkte meistens am unteren Ende der Verteilung der grauen Punkte befinden. Unabhängig von Modellensemble und Klimaszenario liegen nur sehr wenige Modelltrendwerte unterhalb der DWD-Gebietsniederschlagstrendwerte. Das deutet darauf hin, dass die meisten der in diese Analyse einbezogenen Klimamodelle das Wasserdargebot aus der Atmosphäre bis zum Jahr 2022 überschätzen. Um sich den Trends der mittleren Modellwerte anzunähern, müssten die Jahressummen und die jahreszeitlichen Summen des Gebietsniederschlags in den kommenden Jahren in Baden-Württemberg stark ansteigen.

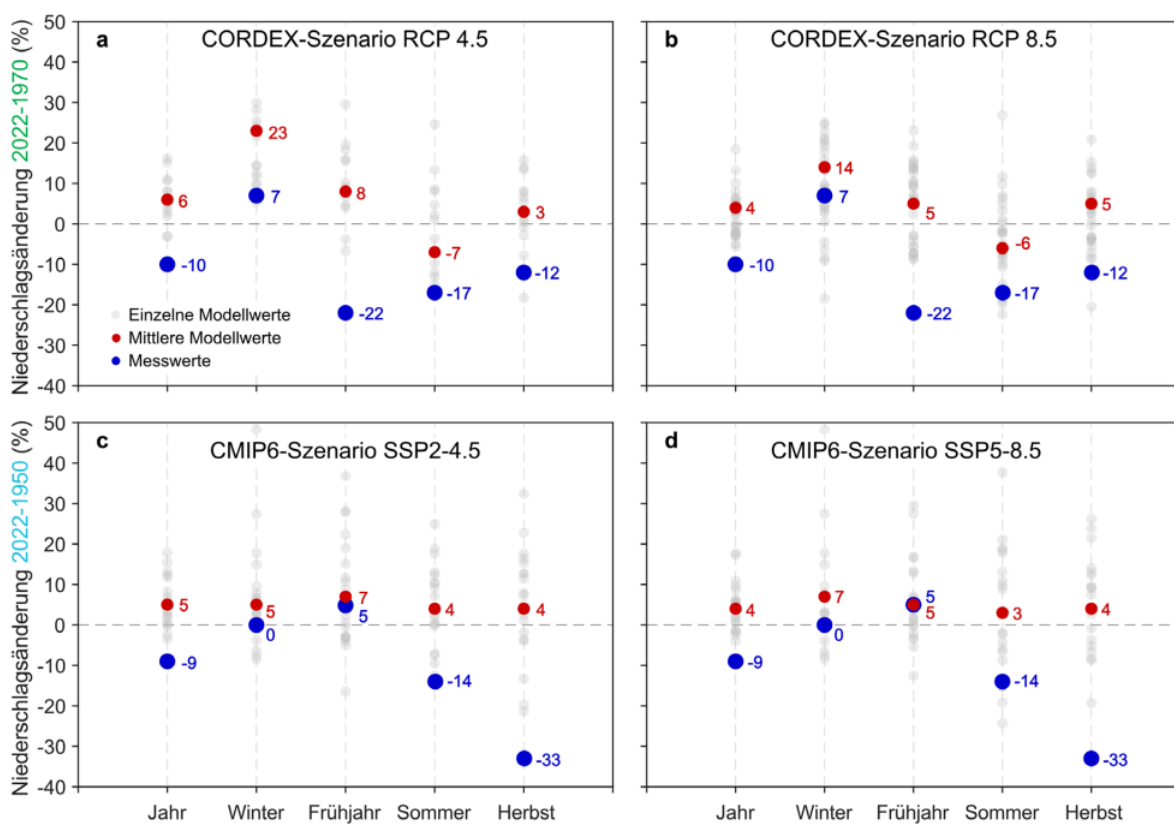


Abbildung 12: Relative Änderungen (%) des Trends des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg im Zeitraum 2022-1970 für den EURO-CORDEX-Modellwerte für die Klimaszenarien (a) RCP 4.5 und (b) RCP 8.5 vorliegen, mit DWD-Gebietsniederschlagswerten, die auf Messungen beruhen sowie relative Änderungen zwischen dem Jahr 2022 und dem Jahr 1950 für den CMIP6-Modellwerte verbunden mit den Klimaszenarien (c) SSP2-4.5 und (d) SSP5-8.5 genutzt werden können. Blaue Punkte repräsentieren Änderungen der auf Messwerten beruhenden mittleren DWD-Gebietsniederschlagswerte. Rote Punkte markieren Änderungen der Trends der mittleren Klimamodellwerte. Graue Punkte kennzeichnen Änderungen der Trends einzelner Klimamodelle.

## 5. Schlussfolgerungen

Gegenwärtig läuft die klimawandelbedingte Lufttemperatur- und Niederschlagsentwicklung in Baden-Württemberg schneller und ungünstiger ab, als bisher erwartet. Im Gegensatz zur klimawandelbedingten Lufttemperaturentwicklung, die im Zeitraum 1881-2022 einen langfristigen Anstieg aufweist, ändert sich im Laufe des 20. Jahrhunderts die Richtung der Niederschlagsentwicklung hin zur Gegenwart. Zeigen Trendanalysen, die auf der Verwendung von Geraden basieren, bis in die 1920er Jahre noch einen signifikanten Anstieg der jährlichen Gebietsniederschlagssummen bis ins Jahr 2022 an, kann man mit Trendgeraden, die über die vergangenen 40 bis 50 Jahre berechnet werden, zeigen, dass die mittlere Gebietsniederschlagsmenge in Baden-Württemberg signifikant zurückgeht. Diese Richtungsänderung ist ein wichtiger Ausdruck für die Entwicklung des Wasserdargebots aus der Atmosphäre und der Wasserverfügbarkeit am und im Boden. Sollte sich diese rückläufige Entwicklung fortsetzen, so ist in den kommenden Jahren und Jahrzehnten in Baden-Württemberg mit einer deutlich geringeren Wasserverfügbarkeit zu rechnen als im 20. Jahrhundert.

Besonders alarmierend erscheint die Tatsache, dass die reale Entwicklung in Baden-Württemberg für Baden-Württembergs Wirtschaft und Gesellschaft wesentlich ungünstiger verläuft, als die regionalisierten Ergebnisse der Klimamodelle erwarten lassen. Der Lufttemperaturanstieg ist bereits wesentlich weiter fortgeschritten und wird sich dynamisch fortsetzen, wenn keine wirkungsvollen Maßnahmen zur substanziellen Minderung des Treibhausgasausstoßes ergriffen werden. Die Niederschlagswasserverfügbarkeit im Land hat bereits deutlich abgenommen und auch dieser Trend wird sich – verstärkt durch die steigende Lufttemperatur – weiter fortsetzen.

Die Ergebnisse der Analyse haben eine hohe Relevanz sowohl für den Klimaschutz als auch für die Klimawandelanpassung. Der konsequenten Umsetzung wirksamer Klimaschutzmaßnahmen kommt eine noch höhere Bedeutung zu, um das Eintreten von Worst-Case-Szenarien noch zu verhindern. Gleichzeitig müssen Klimawandelanpassungsmaßnahmen mit einer neuen Vehemenz zeitnah entwickelt und umgesetzt werden, um Baden-Württemberg als lebenswertes Land und starken Wirtschaftsstandort zu erhalten. Weit intensivere Maßnahmen zur Anpassung an Trockenheit und Hitze ebenso zur Speicherung und Nutzung von Regenwasser insbesondere auch aus Starkregenereignissen sind bereits in sehr naher Zukunft erforderlich, um den Zusammenhalt der Gesellschaft nicht zu gefährden.

Denn ohne eine rasche Entwicklung umfassender und gleichzeitig passgenauer Klimawandelanpassungsmaßnahmen und deren konsequente Umsetzung werden die Auswirkungen auf Baden-Württembergs Wirtschaft und Gesellschaft weit gravierender sein als bislang angenommen. Insbesondere dem Thema Trockenheit muss deutlich mehr Bedeutung beigemessen und entsprechende Gegenmaßnahmen entwickelt werden. Denn selbst wenn das Niederschlagsniveau auf dem heutigen Level konstant bleiben sollte, wird die Trockenheit aufgrund der steigenden Lufttemperatur weiter zunehmen. Treten niederschlagsbezogen Worst-Case-Entwicklungen ein, wird bei weiter rückläufigen Niederschlägen die ausreichende Wasserversorgung von Ökosystemen, der Gesellschaft und Wirtschaft vor neue

---

Herausforderungen gestellt, ähnlich wie dies in unseren Nachbarländern Italien und Frankreich schon zu beobachten ist. Auch eine geringere Verfügbarkeit und Erzeugungsleistung von fossilen Kraftwerken und Wasserkraftwerken sind zu erwarten. Deshalb sind frühzeitig Infrastrukturen für eine ganzheitliche nachhaltige Wasserbewirtschaftung zu entwickeln und aufzubauen. Dies schließt explizit Bewässerungsinfrastrukturen für die Landwirtschaft, die Deckung von Kühlungsbedarfen in städtischen Bebauungskontexten, aktive Wassersparmaßnahmen von Wirtschaft und Bevölkerung, eine geänderte Bewirtschaftung von Lauf- und Speicherwasserkraftwerken sowie ein effizientes Niedrigwassermonitoring ein.

## 6. Literaturverzeichnis

1. DWD (Deutscher Wetterdienst), 2023: Zeitreihen und Trends. Verfügbar online: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html> (Zugriff am 01.08.2023)
2. DWD-CDC (*Climate Data Center* des Deutschen Wetterdienstes), 2023: Jährliche Gebietsmittel des Niederschlags (Jahressumme) für den Zeitraum 1881-2002 (in mm). Verfügbar online: [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/regional\\_averages\\_DE/annual/precipitation/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/regional_averages_DE/annual/precipitation/) (Zugriff am 01.08.2023)
3. Mann, H.B., 1945: Non-parametric tests against trend. *Econometrica* 13, 163-171. Verfügbar online: <https://doi.org/10.2307/1907187> (Zugriff am 01.08.2023)
4. Kendall, M.G., 1975: *Rank Correlation Methods*, 4th edition, Charles Griffin, London.
5. Massey, F.J., 1951: The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit. *Journal of the American Statistical Association* 46, 68-78. Verfügbar online: <https://doi.org/10.2307/2280095> (Zugriff am 01.08.2023)
6. Marsaglia, G., Tsang, W., Wang, J., 2003: Evaluating Kolmogorov's Distribution. *Journal of Statistical Software* 8, 1-4. Verfügbar online: <https://doi.org/10.18637/jss.v008.i18> (Zugriff am 01.08.2023)
7. Fliß, R., Baumeister, C., Gudera, T., Hergesell, M., Kopp, B., Neumann, J., Posselt, M., 2021: Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser und die Wasserversorgung in Süddeutschland. *Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 26, 33-45. Verfügbar online: <https://doi.org/10.1007/s00767-021-00477-z> (Zugriff am 01.08.2023)
8. Spiecker, H., Kahle, H.-P., 2023: Climate-driven tree growth and mortality in the Black Forest, Germany – Long-term observations. *Global Change Biology* 00, 1-16. Verfügbar online: <https://doi.org/10.1111/gcb.16897> (Zugriff am 06.09.2023)
9. Fischer, E.M., Knutti, R., 2015: Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Climate Change* 5, 560-564. Verfügbar online: <https://www.nature.com/articles/nclimate2617> (Zugriff am 01.08.2023)
10. Fischer, E.M., Knutti, R., 2016: Observed heavy precipitation increase confirms theory and early models. *Nature Climate Change* 6, 986-991. Verfügbar online: <https://doi.org/10.1038/nclimate3110> (Zugriff am 01.08.2023)
11. Witze, A., 2018: Why extreme rains are getting worse. *Nature* 563, 458-461. Verfügbar online: <https://www.nature.com/articles/d41586-018-07447-1> (Zugriff am 01.08.2023)
12. Deutscher Wetterdienst und Extremwetterkongress, 2021: Was wir heute über das Extremwetter in Deutschland wissen. Stand der Wissenschaft zu extremen Wetterphänomenen im Klimawandel in Deutschland. Verfügbar online: [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle\\_meldungen/210922/Faktenpapier-Extremwetterkongress.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle_meldungen/210922/Faktenpapier-Extremwetterkongress.html) (Zugriff am 01.08.2023)
13. KLIWA (Klimaveränderung und Wasserwirtschaft), 2021: Klimawandel in Süddeutschland. Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen. Klimamonitoring im Rahmen der Kooperation KLIWA. Monitoringbericht 2021. Verfügbar online: [https://www.kliwa.de/download/KLIWA\\_Monitoringbericht\\_2021.pdf](https://www.kliwa.de/download/KLIWA_Monitoringbericht_2021.pdf) (Zugriff am 01.08.2023)
14. Zeder, J., Fischer, E.M., 2020: Observed extreme precipitation trends and scaling in Central Europe. *Weather and Climate Extremes* 29, 100266. Verfügbar online: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100266> (Zugriff am 01.08.2023)
15. EURO-CORDEX, 2023: EURO-CORDEX - Coordinated Downscaling Experiment - European Domain. Verfügbar online: <https://www.euro-cordex.net/> (Zugriff am 01.08.2023)
16. ReKliEs-De, 2020: Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland (ReKliEs-De). Verfügbar online: <https://reklies.hinug.de/home> (Zugriff am 01.08.2023)
17. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., Taylor, K.E., 2016: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development* 9, 1937-1958. Verfügbar online: <https://gmd.copernicus.org/articles/9/1937/2016/> (Zugriff am 01.08.2023)
18. Meinshausen, M. et al., 2020: The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geoscientific Model Development* 13, 3571-3605. Verfügbar online: <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020> (Zugriff am 01.08.2023)

19. Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetz Baden-Württemberg (KlimaG BW) vom 7. Februar 2023\*), 2023: Verfügbar online: [https://www.landesrecht-bw.de/jportal/?quelle=jlink&query=KlimaSchG+BW&psml=bsbawueprod.psml&max=true&aiz=true#\\_XY\\_d947255e253\\_text](https://www.landesrecht-bw.de/jportal/?quelle=jlink&query=KlimaSchG+BW&psml=bsbawueprod.psml&max=true&aiz=true#_XY_d947255e253_text) (Zugriff am 01.08.2023)
20. Kruskal, W.H., Wallis, W.A., 1952: Use of ranks in one-criterion variance analysis. Journal of the American Statistical Association 47, 583-621. Verfügbar online: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1952.10483441> (Zugriff am 01.08.2023)
21. Tukey, J.W., 1949: Comparing Individual Means in the Analysis of Variance. Biometrics 5, 99-114. Verfügbar online: <https://www.jstor.org/stable/3001913> (Zugriff am 01.08.2023)
22. Schmidt, M., Schindler, D., Arneth, A., Kesselring, S., Lötters, S., Pehnt, M., Hackbarth, A., Jung, C., Laimer, T., Liebhart, L., Ortner, S., Seibt, K., 2023: Klimawandelbedingter Lufttemperaturanstieg in Baden-Württemberg seit 1881. Kurzpapier des Klima-Sachverständigenrats Baden-Württemberg. Verfügbar online: [https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/4\\_Klima/Klimaschutz/Klima-Sachverstaendigenrat/230316-Kurzpapier-Lufttemperaturanstieg-KlimasachverstaendigenratBW-barrierefrei.pdf](https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/4_Klima/Klimaschutz/Klima-Sachverstaendigenrat/230316-Kurzpapier-Lufttemperaturanstieg-KlimasachverstaendigenratBW-barrierefrei.pdf) (Zugriff am 01.08.2023)
23. de Valk, C.F., 2020: Standard method for determining a climatological trend. Royal Netherlands Meteorological Institute, Technical Report, TR-389. Verfügbar online: [https://cdn.knmi.nl/system/ckeditor\\_assets/attachments/161/TR389.pdf](https://cdn.knmi.nl/system/ckeditor_assets/attachments/161/TR389.pdf) (Zugriff am 01.08.2023)
24. DWD (Deutscher Wetterdienst), 2023: Deutscher Klimaatlas: Verfügbar online: [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html) (Zugriff am 01.08.2023)