

IMPULSPAPIER

Klimawandelbedingte Veränderungen des Wasserhaushalts in Baden-Württemberg: Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit

Maïke Schmidt · Dirk Schindler · Almut Arneth
Elisabeth Angenendt · Sven Kesselring · Martin Pehnt

STAND

14.04.2026



KLIMA-SACHVERSTÄNDIGENRAT
BADEN-WÜRTTEMBERG

IMPRESSUM

Klima-Sachverständigenrat Baden-Württemberg
z. Hd. Geschäftsstelle
Kernerplatz 9
70182 Stuttgart
klima-sachverstaendigenrat@um.bwl.de

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

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

Dr. Elisabeth Angenendt

Universität Hohenheim
Schwerzstraße 44, 70599 Stuttgart
E-Mail: Elisabeth.Angenendt@uni-hohenheim.de
Telefon: +49 711-459 22569

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. 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 Mitarbeitenden:

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW): Patrick Wolf

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (UF): **Ann-Kristin Kunz**

Universität Hohenheim (UH): David Williams

Karlsruher Institut für Technologie (KIT): Tobias Laimer

Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU): Rafael Labanino

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH (ifeu): Yanik Acker

Zusammenfassung

In Baden-Württemberg lässt sich eine systematische Verschiebung im Wasserhaushalt nachweisen: Während der Niederschlag keinen einheitlichen langfristigen Trend aufweist, nimmt die Verdunstung infolge steigender Lufttemperaturwerte zu. Dadurch geht die klimatische Wasserbilanz (Niederschlag minus Verdunstung) zurück – die zentrale Größe für die Wasserverfügbarkeit in Böden, Gewässern und Grundwasserleitern. Die Grundwasserneubildung reagiert direkt auf diese Entwicklung. Rund 88 % ihrer jährlichen Variabilität seit 1951 lassen sich durch Schwankungen der klimatischen Wasserbilanz erklären. Zudem weisen sprunghafte Veränderungen seit den späten 1980er- und frühen 2000er-Jahren auf strukturelle Änderungen im Wasserhaushalt hin. Räumliche Analysen zeigen, dass in vielen Gemeinden langfristige Veränderungen der Grundwasserneubildung auftreten. Es ergibt sich ein über verschiedene Komponenten konsistentes Signal, das auf eine dominante klimatische Steuerung hinweist, deren regionale Ausprägung unterschiedlich stark ist.

Damit verschieben sich die hydrologischen Rahmenbedingungen messbar. Selbst bei weitgehend konstantem Niederschlag verringert sich die langfristig verfügbare und nutzbare Wassermenge infolge steigender Verdunstung. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, diese veränderten Rahmenbedingungen in die fachlichen Grundlagen und Bewertungsmaßstäbe der Landesplanung und des Wassermanagements zu überführen und in der räumlichen Steuerung von Flächennutzung und Wasserressourcen wirksam werden zu lassen. Dies betrifft insbesondere die Sicherung wasserrelevanter Flächen, die Begrenzung zusätzlicher Nutzungsansprüche in vulnerablen Teilräumen sowie die Stärkung von Rückhalt, Versickerung und Grundwasserneubildung in der Fläche, um Nutzungskonflikte frühzeitig zu adressieren. Ohne konsequenten Klimaschutz werden sich die beobachteten Entwicklungen weiter verstärken und die verbleibenden Handlungsspielräume im Wassermanagement zunehmend einschränken.

Zentrale Botschaften

1. Nicht weniger Niederschlag ist der zentrale Treiber für die Veränderungen im baden-württembergischen Wasserhaushalt, sondern eine zunehmende Verdunstung

Steigende Lufttemperaturwerte erhöhen die atmosphärische Verdunstungsnachfrage, sodass ein wachsender Anteil des Niederschlags wieder an die Atmosphäre abgegeben wird.

2. Wasserhaushalt verschiebt sich systemisch in Richtung geringerer Wasserverfügbarkeit

Der Wasserhaushalt Baden-Württembergs entwickelt sich von einem niederschlagsgetriebenen zu einem stärker energiegetriebenen System, in dem Verdunstung die zentrale Steuergröße wird und die verfügbare Wasserressource begrenzt.

3. Selbst bei gleichbleibendem Niederschlag steht weniger Wasser zur Verfügung

Die zunehmende Verdunstung reduziert die klimatische Wasserbilanz (Niederschlag minus Verdunstung) und damit die langfristig nutzbare Wasserverfügbarkeit.

4. Grundwasserneubildung reagiert direkt auf diese Entwicklung

Rund 88 % der jährlichen Schwankungen der Grundwasserneubildung lassen sich im Zeitraum 1951–2024 durch die klimatische Wasserbilanz erklären.

5. Hydrologische Rahmenbedingungen verändern sich strukturell, mit regional unterschiedlich ausgeprägter Wirkung

Räumliche Analysen zeigen, dass sich die Wasserverfügbarkeit in vielen Regionen Baden-Württembergs langfristig verändert.

6. Wasserverfügbarkeit wird zu einer zentralen und zunehmend raumwirksamen Steuergröße für Planung und Nutzung

Die veränderten Rahmenbedingungen erfordern, Wasserverfügbarkeit systematisch in die fachlichen Grundlagen und Bewertungsmaßstäbe von Landesplanung und Wassermanagement zu überführen und in der räumlichen Steuerung wirksam werden zu lassen.

7. Klimaschutz und Anpassung sind gemeinsam erforderlich.

Ohne konsequenten Klimaschutz werden sich die beobachteten Entwicklungen weiter verstärken. Anpassungsmaßnahmen können die Auswirkungen abmildern, jedoch keine strukturellen Defizite der klimatischen Wasserbilanz kompensieren.

1 Einleitung

Klimamodellanalysen zeigen, dass sich der klimawandelbedingte Wassermangel in den kommenden Jahrzehnten in Europa weiter verstärken wird. Der lufttemperaturbedingte Anstieg der Verdunstung übertrifft in vielen Regionen die projizierten Änderungen der Niederschläge, wodurch sich das Verhältnis zwischen Wasserangebot und Verdunstung zunehmend in Richtung eines Wasserdefizits verschiebt. Während bereits heute wasserlimitierte Regionen – insbesondere im Mittelmeerraum – eine weitere Intensivierung der Trockenheit erfahren, treten entsprechende Tendenzen zunehmend auch in bislang feucht geprägten Teilen Europas auf (Crapart et al., 2026).

Vor dem Hintergrund dieser europaweiten Entwicklung stellt sich die Frage, welchen Einfluss der Klimawandel auf die Wasserverfügbarkeit in den vergangenen Jahrzehnten in Baden-Württemberg hatte und wie sich die großräumigen Veränderungen des europäischen Wasserhaushalts künftig auf die regionale Wasserverfügbarkeit auswirken könnten.

Eine geeignete Grundlage für diese Analyse bildet die terrestrische Wasserbilanz in Deutschland. Sie lässt sich über längere Zeiträume durch die Änderung der terrestrischen Wasserspeicherung (ΔS) infolge der Niederschlags- (N), Verdunstungs- (V) und Abflussentwicklung (A) beschreiben (Fohrer et al., 2026):

$$\Delta S = N - V - A$$

Die terrestrische Wasserspeicherung umfasst Oberflächengewässer, Vegetationswasser, Bodenwasser, Grundwasser sowie Eis und Schnee. Sie wirkt wie ein Puffer im Wasserhaushalt. Wird mehr Wasser zu- als abgeführt, füllen sich die Speicher, übersteigen Verdunstung und Abfluss die Niederschlagszufuhr, leeren sie sich.

In Deutschland wird ein erheblicher Teil des Niederschlags nicht nur über Flüsse abgeführt, sondern auch über die Verdunstung (Kleidon, 2024). Dieses Wasser steigt als Wasserdampf auf, wird mit Luftströmungen transportiert und regnet häufig nicht wieder über Deutschland aus, sondern in anderen Regionen Europas oder über dem Ozean (Bisselink und Dolman, 2008). Niederschlag über Europa entsteht somit aus einer Kombination maritimer und kontinentaler Feuchtequellen (Krug et al., 2022). Rund ein Drittel des Niederschlags über Land stammt aus terrestrischer Verdunstung (Van der Ent et al., 2010). Für Mitteleuropa ergibt sich ein Recyclinganteil von etwa 25–35 %, der von West nach Ost zunimmt. Neuere Modellanalysen zeigen, dass dieser Anteil mit zunehmender Erwärmung tendenziell abnimmt, da höhere Lufttemperaturwerte die atmosphärische Feuchtespeicherkapazität erhöhen und damit die Transportdistanz von Wasserdampf vergrößern (Staal et al., 2025). Als Konsequenz wird ein größerer Teil der über Land verdunsteten Feuchte in nachgelagerten Regionen wieder ausregnen, während der lokale Beitrag zur Niederschlagsbildung abnimmt.

Treffen über mehrere Jahre erhöhte Verdunstungsraten mit durchschnittlichen oder unterdurchschnittlichen Niederschlagsmengen zusammen, kann sich ein strukturelles Defizit in den Wasserspeichern aufbauen. Die daraus resultierenden Trockenperioden wirken sich entlang einer hydrologisch-ökologischen Wirkungskette aus (Conradt et al., 2023): Zunächst nimmt die Bodenfeuchte ab, in der Folge sinken Grundwasserstände und Abflüsse. Gleichzeitig wird die Vegetationsentwicklung beeinträchtigt, was insbesondere in der Land- und Forstwirtschaft zu erheblichen Ertragsein-

bußen führen kann. Für Deutschland zeigen Analysen der Dürrejahre 2018–2019 beispielsweise Produktionsverluste von etwa 20–40 % bei wichtigen Feldfrüchten und massive Schäden in Wäldern mit stark erhöhtem Schadholzanfall. Länger anhaltende Trockenperioden können somit nicht nur ökologische Auswirkungen auf Vegetation und Wasserhaushalt haben, sondern auch erhebliche negative wirtschaftliche und gesellschaftliche Folgen verursachen.

Diese Zusammenhänge spiegeln sich zunehmend auch in großräumigen Messungen der terrestrischen Wasserspeicherung wider. Mithilfe satellitengestützter gravimetrischer Messungen lassen sich zeitliche Veränderungen des Erdschwerefeldes erfassen und daraus Änderungen der terrestrischen Wasserspeicherung ableiten. Datensätze der GRACE- und GRACE-FO-Satelliten (Dahle et al., 2025) ermöglichen es, monatliche Schwankungen der gesamten terrestrischen Wasserspeicherung auf kontinentaler und nationaler Skala zu bestimmen (Güntner et al., 2023).

Abbildung 1a zeigt die monatlichen Anomalien der terrestrischen Wasserspeicherung in Deutschland zwischen April 2002 und Oktober 2025 auf Grundlage der GRACE- und GRACE-FO-Daten. Die Punkte markieren die Monatswerte, die Linie den linearen Trend. Über den gesamten Zeitraum ergibt sich ein signifikanter negativer Trend von -1.73 ± 0.22 (95%-Konfidenzintervall) Gigatonnen (Gt) Wasser pro Jahr. Trotz ausgeprägter monatlicher und jährlicher Schwankungen deutet dieser Trend auf eine fortschreitende Abnahme der im System aus Vegetations-, Boden-, Grund- und Oberflächenwasser gespeicherten Wassermenge hin.

Abbildung 1b zeigt den mittleren saisonalen Zyklus dieser Speicherveränderungen. Das Wasserfalldiagramm stellt die durchschnittliche monatliche Änderung der Wasserspeicherung innerhalb eines typischen Jahres dar. In den Wintermonaten (Oktober–März) wird der Speicher im Mittel aufgefüllt, während in den Sommermonaten (April–September) ein deutlicher Abbau erfolgt. Die letzte Säule fasst die aus diesem saisonalen Zyklus resultierende mittlere Jahresbilanz zusammen und weist ein Netto-Defizit von rund -1.5 Gt pro Jahr auf. Dies entspricht dem mittleren jährlichen Verlust. Einzelne Jahre können aufgrund der natürlichen Variabilität davon abweichen.

Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit den zuvor beschriebenen Veränderungen im Zusammenspiel von Niederschlag und Verdunstung. In den vergangenen Jahren hat sich gezeigt, dass selbst niederschlagsreiche Winter nicht immer ausreichen, um die sommerlichen Verdunstungsverluste vollständig auszugleichen. Mit steigender Lufttemperatur ist davon auszugehen, dass sich die atmosphärische Verdunstungsnachfrage weiter erhöht. Dadurch verschiebt sich das Verhältnis von Niederschlag und Verdunstung zunehmend zulasten der Wasserspeicherung. Mehrere trockene Sommer in Folge können so zunehmende Speicherdefizite aufbauen, die durch Winter mit durchschnittlichen Niederschlagsmengen nicht mehr vollständig ausgeglichen werden. Die Folgen sind eine erhöhte Anfälligkeit für Trockenperioden, sinkende Grundwasserstände sowie zunehmende Belastungen für Landwirtschaft, Wälder und Gewässer (Conradt et al., 2023).

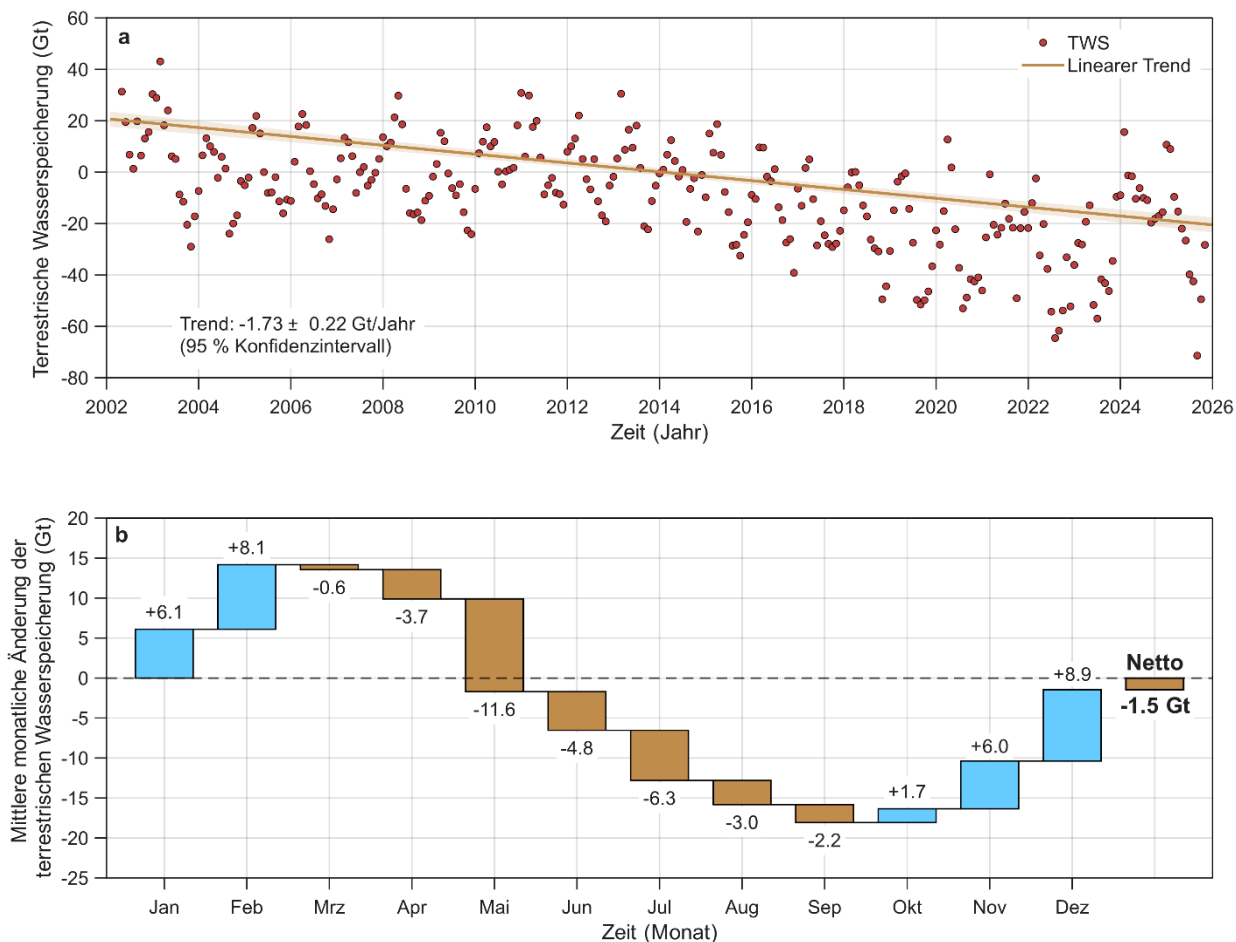


Abbildung 1: (a) Entwicklung der monatlichen terrestrischen Wasserspeicherung (TWS) von April 2002 bis Oktober 2025 in Deutschland auf Grundlage von GRACE- und GRACE-FO-Daten. Die Punkte zeigen die Monatswerte, die Linie den linearen Trend mit einer mittleren Abnahme von -1.73 ± 0.22 Gt pro Jahr (95%-Konfidenzintervall). (b) Mittlere monatliche Änderung der terrestrischen Wasserspeicherung (22 vollständige Jahre) in Deutschland. Blaue Balken zeigen Monate mit Speicherauffüllung, braune Balken Monate mit Speicherentleerung. Die letzte Säule zeigt die langjährige mittlere Jahresbilanz und weist ein Defizit von etwa -1.5 Gt pro Jahr auf.

Auch auf Ebene der Landesplanung werden diese Veränderungen zunehmend adressiert. So hebt das Eckpunktepapier zur Fortschreibung des Landesentwicklungsplans Baden-Württemberg die wachsende Bedeutung der Sicherung der Wasserversorgung hervor und verweist auf zunehmende Nutzungskonflikte sowie steigende Anforderungen an die räumliche Steuerung wasserrelevanter Flächen (MLW BW, 2023). Damit wird deutlich, dass Veränderungen im Wasserhaushalt nicht nur hydrologische, sondern auch raumplanerische und gesellschaftliche Fragestellungen betreffen.

Die satellitengravimetrischen Daten belegen eine fortschreitende Abnahme der terrestrischen Wasserspeicherung in Deutschland, die sich aus einem zunehmenden Ungleichgewicht zwischen winterlicher Auffüllung und sommerlichen Verlusten ergibt. Der saisonale Zyklus allein erklärt diese langfristige Abnahme jedoch nicht. Entscheidend ist, wie sich zentrale Komponenten des Wasserhaushalts – insbesondere Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und Grundwasserneubildung – infolge des regionalen Klimawandels in Baden-Württemberg entwickelt haben.

Eine vollständig geschlossene Wasserbilanz lässt sich auf Landesebene aus Messdaten nur eingeschränkt rekonstruieren, weil nicht alle Komponenten des Wasserhaushalts messtechnisch erfasst

werden können. Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden untersucht, wie sich zentrale Komponenten des Wasserhaushalts in Baden-Württemberg in den vergangenen Jahrzehnten entwickelt haben.

Die Analyse erfolgt komponentenbasiert auf Grundlage mehrerer unabhängiger Datensätze, die die Entwicklung unterschiedlicher Teile des baden-württembergischen Wasserhaushalts abbilden. Neben der langfristigen Entwicklung des Gebietsniederschlags werden die modellierte Verdunstung, die Grundwasserneubildung und repräsentative Abflusszeitreihen großer Landespegel analysiert. Auf dieser Grundlage wird gezeigt, dass sich die beobachtete Abnahme der terrestrischen Wasserspeicherung in Deutschland in konsistenten Veränderungen zentraler Komponenten des regionalen Wasserhaushalts in Baden-Württemberg widerspiegelt.

2 Entwicklung von Wasserhaushaltskomponenten

2.1 Niederschlagsentwicklung

Abbildung 2 zeigt, wie sich Niederschlagsüberschüsse und -defizite in Baden-Württemberg seit 1881 über längere Zeiträume hinweg aufgebaut haben. Hierzu wurden mehrere überlappende 30-jährige Referenzperioden definiert (1881–1910, 1891–1920, ..., 1991–2020). Für jedes Jahr wurde die Abweichung des Niederschlags vom Mittelwert dieser Referenzperioden berechnet und anschließend über ein gleitendes 30-jähriges Zeitfenster aufsummiert. Diese Darstellung macht sichtbar, ob sich über mehrere Jahre hinweg eher feuchtere oder trockenere Bedingungen einstellen. Sie ist damit näher an der hydrologischen Realität als die Betrachtung einzelner Jahre, da die klimatische Wasserverfügbarkeit entscheidend davon abhängt, ob sich Wasserdefizite oder -überschüsse über längere Zeiträume aufbauen.

Die kumulierten Niederschlagsanomalien im Jahresmittel (Abbildung 2a) zeigen über den gesamten Zeitraum seit 1881 keine eindeutige langfristige Entwicklung, jedoch eine ausgeprägte mehrdekadische Variabilität. Auffällig ist die Entwicklung seit den frühen 2000er Jahren: Nach einer Phase überdurchschnittlicher Niederschläge nehmen die Anomalien deutlich ab und nähern sich zuletzt wieder dem langjährigen Mittel an. Diese Entwicklung ist hydrologisch relevant, da im Kontext steigender Lufttemperatur bereits durchschnittliche Niederschlagsmengen zunehmend nicht mehr ausreichen, um durch die Verdunstung verursachte Wasserverluste auszugleichen.

Im Sommer (Abbildung 2b) deutet sich seit den 1940er Jahren eine leichte, über längere Zeiträume konsistente Abnahme der Niederschlagsanomalien an. Trotz hoher Variabilität spricht diese Entwicklung für eine zunehmende Neigung zu sommerlichen Niederschlagsdefiziten.

Im Winter (Abbildung 2c) zeigt sich – ähnlich wie im Jahresmittel – keine monotone langfristige Entwicklung. Stattdessen treten Phasen erhöhter und verminderter Niederschläge auf, mit einer Zunahme seit den 1980er Jahren und einer Abschwächung in jüngerer Zeit.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass sich Veränderungen im Niederschlag weniger in linearen Trends als in zeitlich begrenzten Phasen erhöhter oder verminderter klimatischer Wasserverfügbarkeit äußern. Bereits solche Phasen können, insbesondere bei gleichzeitig steigender Verdunstung, ausreichen, um hydrologisch relevante Wasserdefizite zu verursachen.

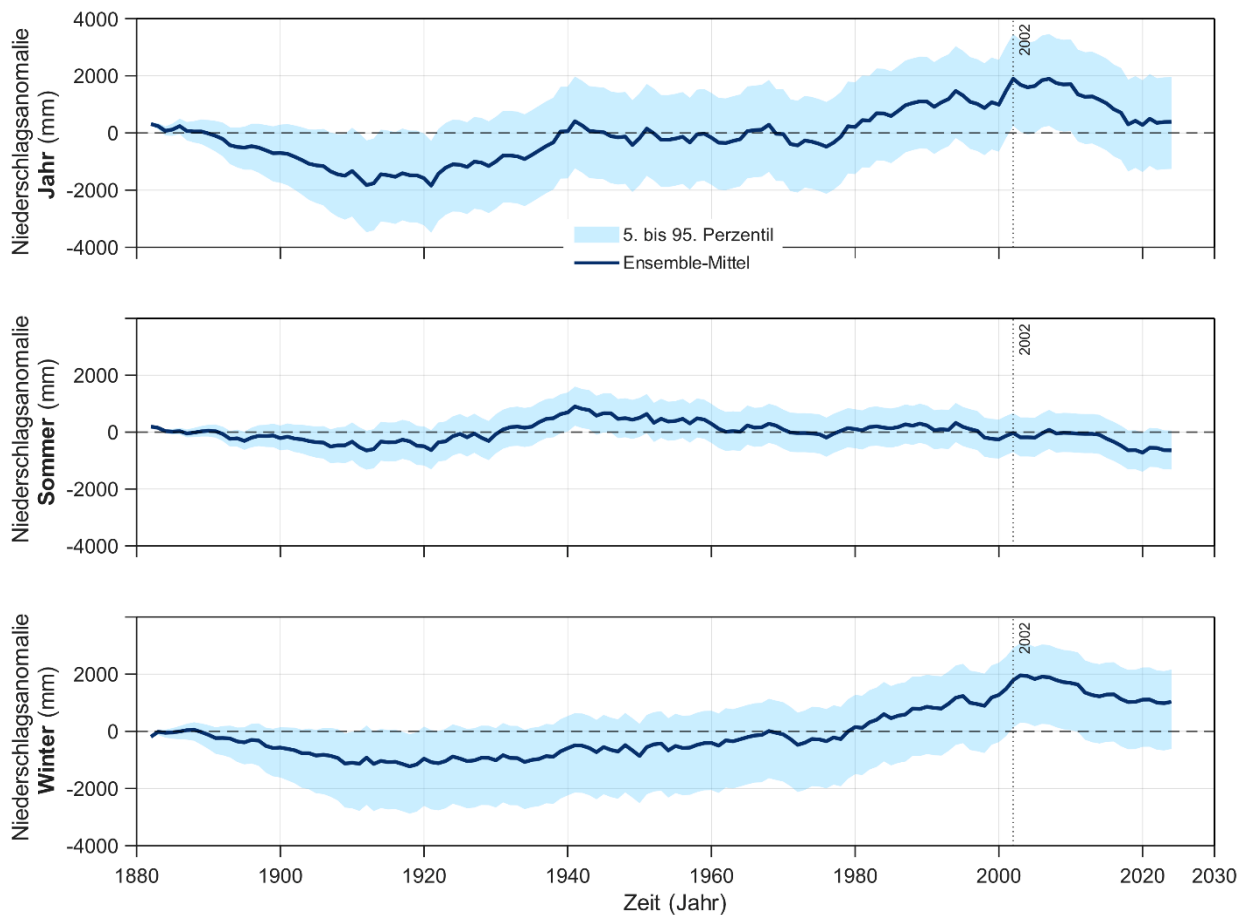


Abbildung 2: Niederschlagsanomalien 1881–2024 in Baden-Württemberg für (a) das Gesamtjahr, (b) das Sommerhalbjahr (April–September) und (c) das Winterhalbjahr (Oktober–März). Die durchgezogenen Linien zeigen die Ensemble-Mittel der Anomalien relativ zu langjährigen Referenzwerten, die schattierten Flächen die Unsicherheitsbereiche zwischen dem 5. und 95. Perzentil. Positive Werte kennzeichnen niederschlagsreichere, negative Werte niederschlagsärmere Bedingungen.

Die seit den frühen 2000er-Jahren beobachtete Abnahme der Niederschlagsanomalien ist dabei nicht als isoliertes regionales Phänomen zu verstehen, sondern steht im Kontext großskaliger Veränderungen des europäischen Niederschlagsgeschehens. Dekadische Verschiebungen im Niederschlag werden maßgeblich durch Änderungen der atmosphärischen Zirkulation und interne Klimavariabilität gesteuert, die klimawandelbedingte Trends zeitweise überlagern oder verstärken können (Yao et al., 2026).

Analysen von Trockenperioden in Europa zeigen, dass großskalige Zirkulationsmuster einen wichtigen, jedoch nicht allein dominierenden Beitrag zur Entwicklung von Niederschlagsdefiziten leisten. Etwa die Hälfte der Ereignisse lässt sich durch Anomalien in Häufigkeit und Persistenz typischer Wetterlagen erklären. Dieser Einfluss ist im Winter stärker ausgeprägt als im Sommer; im Sommer dominieren stärker lokale thermodynamische Prozesse (Savary et al., 2026). Die seit den frühen 2000er-Jahren beobachteten Veränderungen im Niederschlagsgeschehen lassen sich daher als Ergebnis einer veränderten Kombination aus großskaliger Zirkulation und regionalen Prozessen interpretieren.

Seit den frühen 2000er-Jahren zeigt sich im Niederschlagsgeschehen in Baden-Württemberg eine Phase abnehmender Anomalien, die sich zuletzt wieder dem langjährigen Mittel annähern. Für die Wasserverfügbarkeit ist dabei weniger die absolute Höhe des Niederschlags entscheidend als dessen Zusammenspiel mit der Verdunstung. Die nach dem Jahr 2002 beobachtete Zustandsänderung (Strukturbruch) markiert einen Übergang zu einem neuen hydrologischen Regime, in dem die Verdunstung die klimatische Wasserverfügbarkeit stärker begrenzt als der Niederschlag.

2.2 Verdunstung und klimatische Wasserbilanz

Abbildung 3 zeigt, dass sich dieses Zusammenspiel seit rund 25 Jahren beobachten lässt. Während der Niederschlag weiterhin durch eine hohe Variabilität geprägt ist, nimmt die Verdunstung kontinuierlich zu (**Abbildung 3a**). In der Folge wird ein wachsender Anteil des Niederschlags unmittelbar wieder an die Atmosphäre abgegeben.

Diese Entwicklung spiegelt sich in der klimatischen Wasserbilanz (Niederschlag minus Verdunstung) wider (**Abbildung 3b**). Nach 2002 ist eine sprunghafte Zustandsänderung erkennbar, nach der im Mittel deutlich weniger Wasser im System verbleibt. Seitdem steht trotz zeitweiser durchschnittlicher Niederschläge weniger Netto-Wasser für Böden, Vegetation und Grundwasserneubildung zur Verfügung.

Die standardisierten Abweichungen (**Abbildung 3c**) verdeutlichen diesen Mechanismus: Die kurzfristigen Schwankungen der klimatischen Wasserbilanz folgen weiterhin dem Niederschlag, gleichzeitig verschiebt die langfristig steigende Verdunstung das gesamte Systemniveau hin zu geringeren Werten. Niederschlag allein reicht daher zunehmend nicht mehr aus, um durch die Verdunstung verursachte Wasserdefizite auszugleichen.

Vor diesem Hintergrund gewinnen die in den letzten Jahren beobachteten Veränderungen besondere Relevanz: Selbst Jahre mit durchschnittlichem Niederschlag können unter den heutigen klimatischen Bedingungen zu einer angespannten Wasserverfügbarkeit führen. Diese Entwicklung wirkt sich unmittelbar auf die Grundwasserneubildung aus, die direkt von der verbleibenden Wasserverfügbarkeit abhängig ist.

Die enge Kopplung zwischen klimatischer Wasserbilanz und Grundwasserneubildung wird in **Abbildung 4** deutlich. Über den gesamten Untersuchungszeitraum zeigt sich eine sehr starke lineare Beziehung zwischen beiden Größen. Rund 88 % der Jahr-zu-Jahr-Schwankungen der Grundwasserneubildung lassen sich durch Veränderungen der klimatischen Wasserbilanz erklären (Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0.88$).

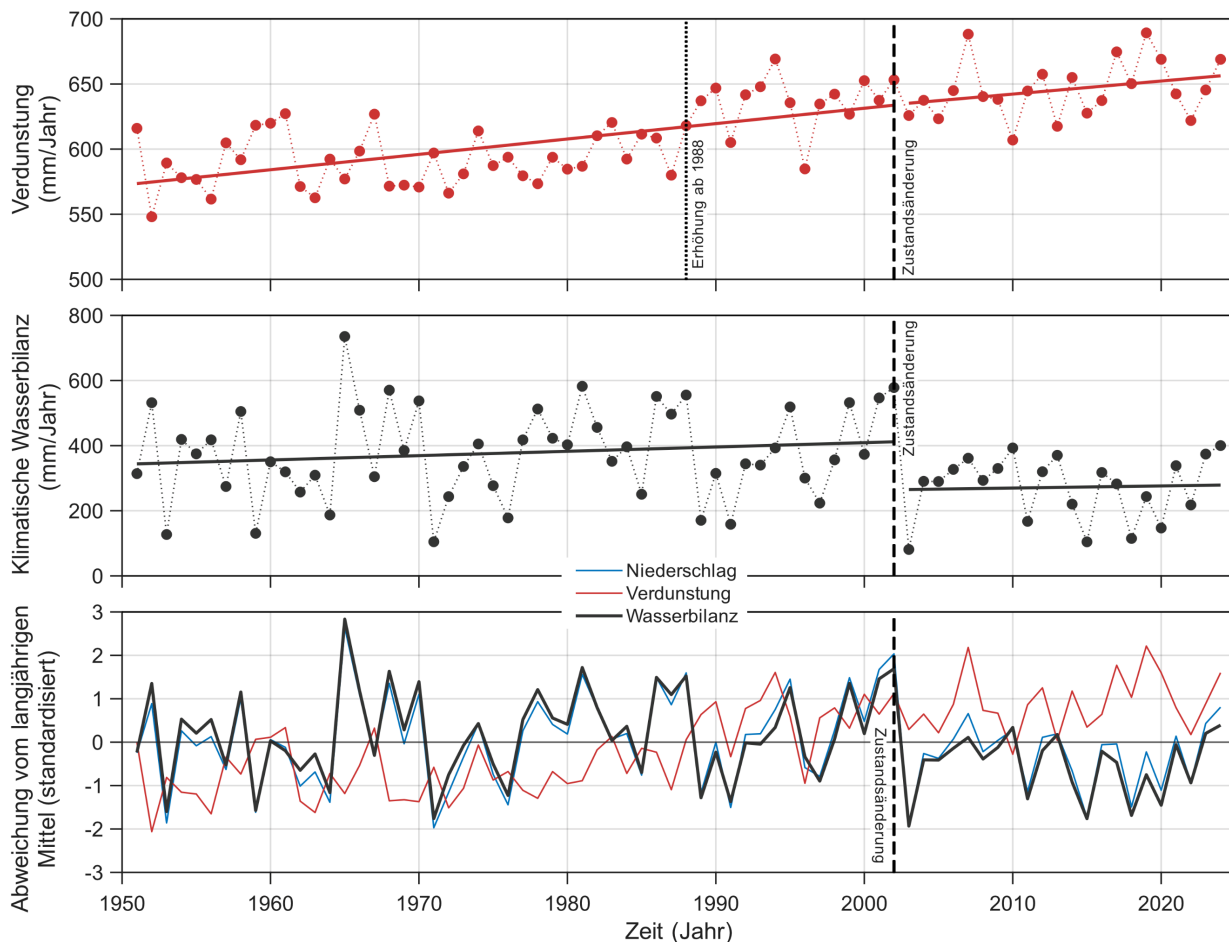


Abbildung 3: (a) Jährliche Verdunstung 1951–2024 in Baden-Württemberg. (b) Klimatische Wasserbilanz (Niederschlag minus Verdunstung). Die Zeitreihe zeigt eine sprunghafte Zustandsänderung (Strukturbruch) nach dem Jahr 2002, nach dem im Mittel weniger Netto-Wasser für Böden, Vegetation und Grundwasserneubildung zur Verfügung steht. (c) Standardisierte Abweichungen von Niederschlag, Verdunstung und klimatischer Wasserbilanz zeigen, dass die Wasserbilanz kurzfristig durch den Niederschlag bestimmt wird, während der langfristige Rückgang auf die zunehmende Verdunstung zurückzuführen ist. Die Standardisierung erfolgt bezogen auf die jeweiligen Mittelwerte und Standardabweichungen 1951–2024.

Die Steigung der Regressionsgeraden beträgt 0.34. Das bedeutet, dass im Mittel rund 34 % des Wasserüberschusses aus Niederschlag minus Verdunstung tatsächlich zur Grundwasserneubildung beitragen. Der verbleibende Anteil wird überwiegend durch Oberflächenabfluss, Bodenwasserspeicherung und weitere hydrologische Prozesse bestimmt.

Die Datenpunkte sind zusätzlich nach zwei Zeitabschnitten eingefärbt. Während die Jahre bis 2002 grau dargestellt sind, markieren rote Punkte die jüngere Periode seit 2003. Beide Zeitabschnitte folgen im Wesentlichen derselben linearen Beziehung. Dies zeigt, dass sich der grundlegende physikalische Zusammenhang zwischen Wasserbilanz und Grundwasserneubildung nicht verändert hat.

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass der Anstieg der Verdunstung direkte Auswirkungen auf die verfügbaren Grundwasserressourcen hat. Mit abnehmender klimatischer Wasserverfügbarkeit sinkt proportional auch die Grundwasserneubildung. Die enge Kopplung zwischen beiden Größen liefert damit eine konsistente, datenbasierte Erklärung für die beobachteten Veränderungen des

regionalen Wasserhaushalts. Diese Zusammenhänge werden auch durch aktuelle Ergebnisse der KLIWA-Kooperation gestützt (KLIWA, 2023a), die auf der Grundlage des RCP8.5-KLIWA-Ensembles (KLIWA, 2023b) zeigen, dass die steigende Lufttemperatur, veränderte Niederschlagsregime und eine reduzierte Schneespeicherung zu einer Abnahme der Grundwasserneubildung in Süddeutschland führen können.

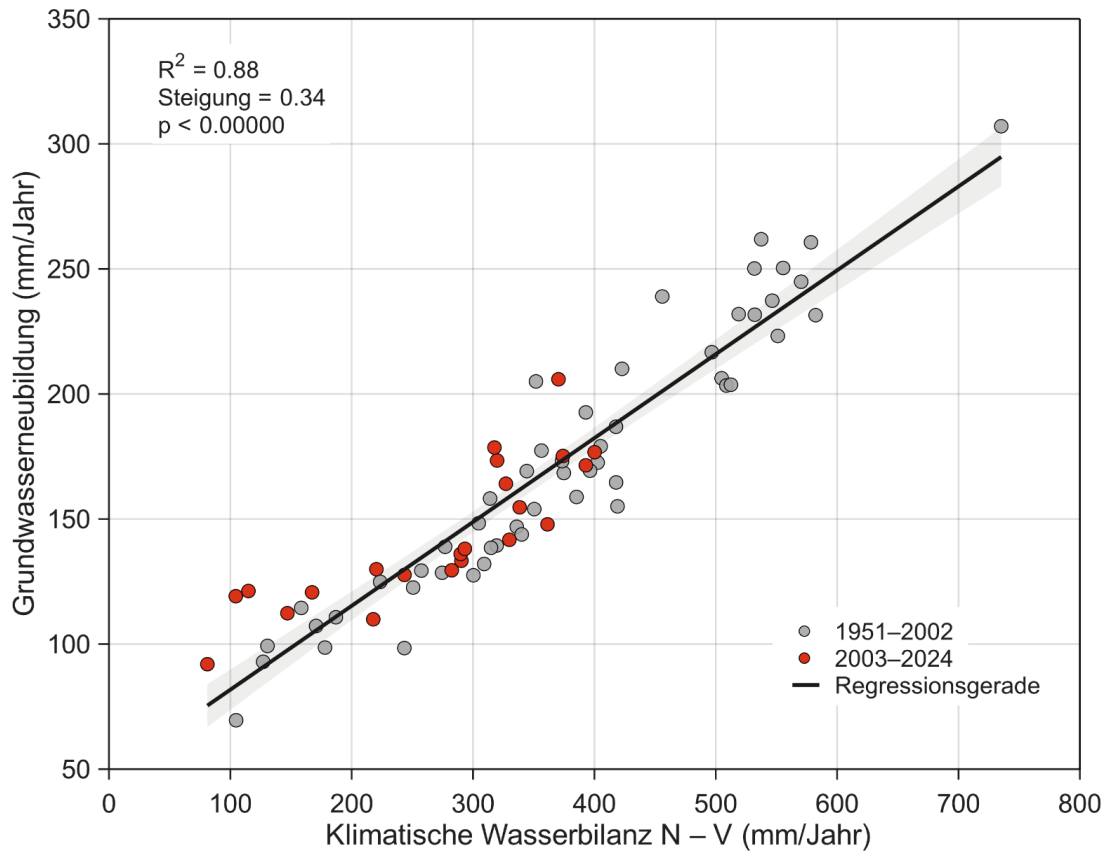


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen klimatischer Wasserbilanz (Niederschlag minus Verdunstung) und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg für den Zeitraum 1951–2024. Jeder Punkt repräsentiert ein Jahr. Die lineare Regression (durchgezogene Linie) zeigt einen sehr starken, signifikanten Zusammenhang ($R^2 = 0.88$, $p < 0.000$). Die Steigung beträgt 0.34 (mm/Jahr pro mm/Jahr), was bedeutet, dass im Mittel etwa 34 % des klimatischen Wasserüberschusses zur Grundwasserneubildung beitragen. Der schattierte Bereich kennzeichnet das 95%-Konfidenzintervall der Regressionsgeraden. Die Daten sind nach zwei Zeiträumen unterschieden (1951–2002 und 2003–2024). Beide folgen im Wesentlichen derselben linearen Beziehung. Die Abbildung verdeutlicht, dass die Grundwasserneubildung in erster Linie durch die klimatische Wasserbilanz gesteuert wird.

2.3 Abfluss

Der Zusammenhang zwischen klimatischer Wasserbilanz und Abfluss wurde an repräsentativen Pegeln in den Einzugsgebieten von Rhein (Pegel Maxau), Donau (Pegel Berg) und Neckar (Pegel Rockenau) untersucht. Die Auswertung erfolgte getrennt für Jahresmittel sowie für Winter- und Sommerhalbjahr, um die saisonale Kopplung zwischen klimatischer Wasserverfügbarkeit und Abfluss sichtbar zu machen.

Der Abfluss an diesen Pegeln integriert neben klimatischen Einflüssen auch Veränderungen der Landnutzung, Gewässerstruktur und Wasserbewirtschaftung. Die vorliegende Analyse fokussiert jedoch auf großräumige und langfristige Zusammenhänge, bei denen die klimatische Wasserbilanz in Baden-Württemberg eine zentrale Steuergröße darstellt. Lokale oder einzelfallbezogene Einflüsse können die Abflussentwicklung überlagern, werden hier jedoch nicht explizit berücksichtigt.

Zur Einordnung möglicher Einflüsse von Landnutzungsänderungen wurden CORINE Land Cover Change-Daten für die Zeiträume 1990–2000, 2000–2006, 2006–2012 und 2012–2018 ausgewertet (Copernicus, 2026). Die Veränderungen sind überwiegend kleinräumig und fragmentiert. Die betroffenen Flächenanteile liegen bei 2.4 %, 0.6 %, 0.4 % und 0.2 % der Landesfläche. Eine landesweit einheitliche Transformation der Landnutzung ist nicht erkennbar. Insgesamt ergeben sich keine Hinweise darauf, dass Landnutzungsänderungen die beobachteten großräumigen Abflussveränderungen dominieren.

Die Regressionsanalyse zwischen klimatischer Wasserbilanz und Abfluss zeigt für alle drei Einzugsgebiete eine enge und statistisch hochsignifikante Kopplung. Je nach Einzugsgebiet und Saison werden etwa 46 % bis 78 % der interannuellen Abflussvariabilität durch die klimatische Wasserbilanz erklärt. Die stärkste Kopplung tritt im Winterhalbjahr auf, wenn die Verdunstung gering ist und ein großer Anteil des Niederschlags unmittelbar abflusswirksam wird. Im Sommerhalbjahr ist die Beziehung ebenfalls deutlich, jedoch schwächer ausgeprägt, da Verdunstung, Bodenwasserspeicherung und weitere Speicherprozesse den Zusammenhang teilweise überlagern.

Besonders aufschlussreich ist, dass sich diese enge Beziehung konsistent für Rhein, Donau und Neckar zeigt. Damit wird deutlich, dass der Zusammenhang nicht auf die spezifische hydrologische Charakteristik eines einzelnen Einzugsgebiets zurückgeführt werden kann, sondern ein großräumiges, klimatisch gesteuertes Signal widerspiegelt. Die Übereinstimmung über drei hydrologisch unterschiedliche Systeme hinweg spricht dafür, dass die klimatische Wasserbilanz eine dominante Steuergröße des Abflussgeschehens in Baden-Württemberg ist.

Die Ergebnisse zeigen zugleich, dass Veränderungen im Abfluss weniger durch einfache lineare Trends als durch eine veränderte klimatische Rahmensituation geprägt sind. Mit abnehmender klimatischer Wasserverfügbarkeit gehen die mittleren Abflüsse auf Jahres- und Halbjahresskalen zurück. Damit lässt sich die Abflussentwicklung konsistent in die zuvor dargestellten Veränderungen von Verdunstung, klimatischer Wasserbilanz und Grundwasserneubildung einordnen.

Insgesamt unterstreicht die Analyse, dass klimatische Veränderungen die Abflussverhältnisse in Baden-Württemberg maßgeblich bestimmen, auch wenn zusätzliche Faktoren innerhalb der Einzugsgebiete die regionale Ausprägung modifizieren können.

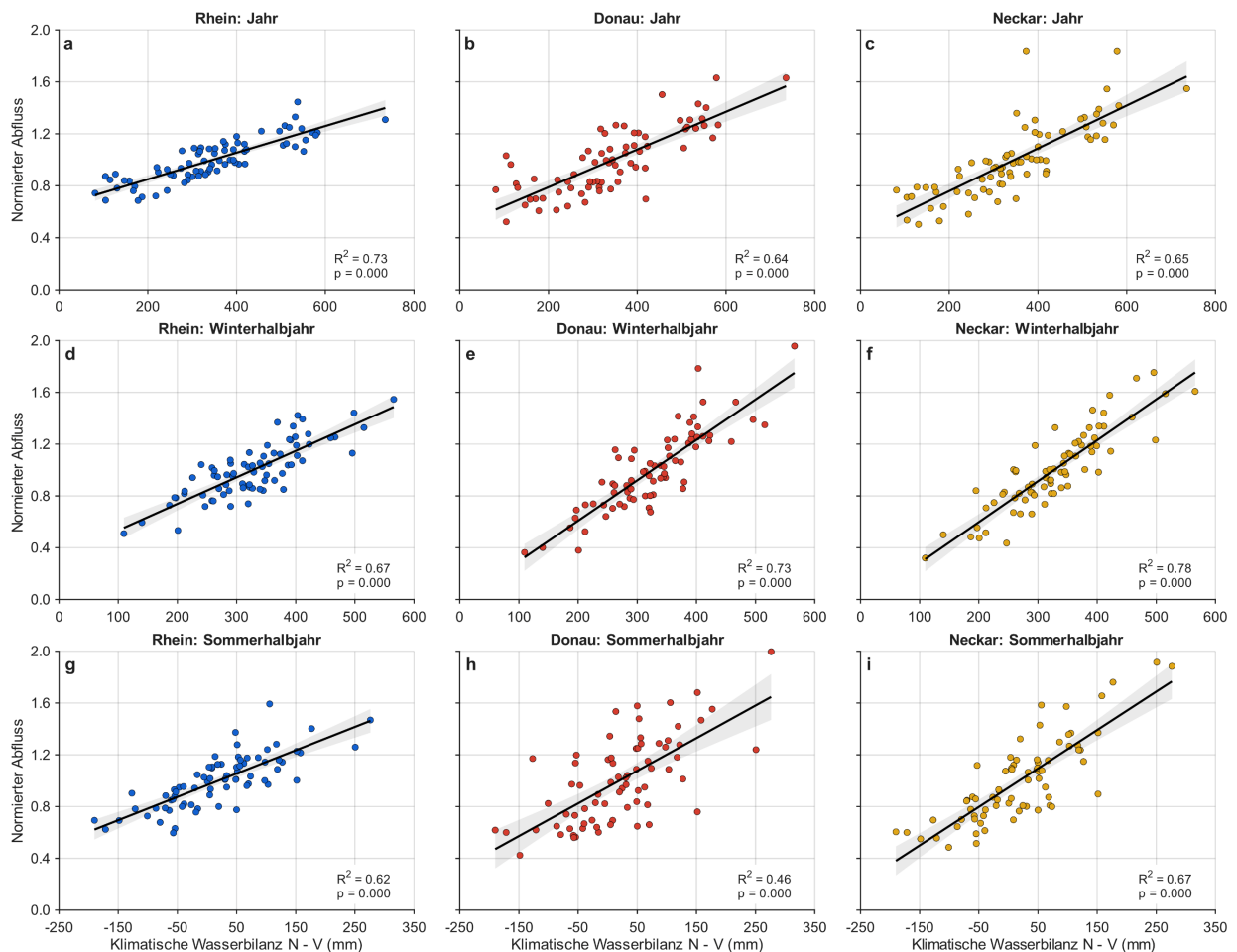


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen klimatischer Wasserbilanz (Niederschlag minus Verdunstung) und normiertem Abfluss in den Einzugsgebieten von Rhein (Pegel Maxau), Donau (Pegel Berg) und Neckar (Pegel Rockenau) für das Gesamtjahr (obere Reihe), das Winterhalbjahr (Oktober–März, mittlere Reihe) und das Sommerhalbjahr (April–September, untere Reihe). Jeder Punkt repräsentiert ein Jahr. Die durchgezogenen Linien zeigen lineare Regressionen, die schattierten Bereiche die 95%-Konfidenzintervalle. In allen drei Einzugsgebieten besteht ein signifikanter positiver Zusammenhang zwischen klimatischer Wasserbilanz und Abfluss. Je nach Einzugsgebiet und Saison werden etwa 46 % bis 78 % der interannuellen Abflussvariabilität durch die klimatische Wasserbilanz erklärt. Die stärkste Kopplung zeigt sich im Winterhalbjahr, die schwächste im Sommerhalbjahr der Donau.

2.4 Grundwasserneubildung

Die räumliche Analyse der Grundwasserneubildung zeigt, dass sich die langfristigen Veränderungen des Wasserhaushalts in Baden-Württemberg regional unterschiedlich ausprägen (Abbildung 6). In vielen Gemeinden ist seit den 1970er-Jahren eine abnehmende Tendenz der Grundwasserneubildung zu beobachten. Besonders ausgeprägt sind diese Rückgänge in Teilen des Oberrheingraben, im Schwarzwald sowie in mehreren Regionen Süd- und West-Baden-Württembergs. Signifikante positive Trends treten dagegen nur vereinzelt auf.

Die Karte der sprunghaften Änderungen zeigt, dass in zahlreichen Gemeinden statistisch signifikante Strukturbrüche in den Zeitreihen der Grundwasserneubildung auftreten. Diese konzentrieren sich überwiegend in den 1990er- und 2000er-Jahren. Gemeinden ohne signifikante Zustandsänderung sind grau dargestellt. Die zeitliche Häufung dieser Bruchpunkte deutet darauf hin, dass die

beobachteten Veränderungen nicht ausschließlich durch lokale Faktoren verursacht werden, sondern zumindest teilweise auf übergeordnete klimatische Entwicklungen zurückzuführen sind.

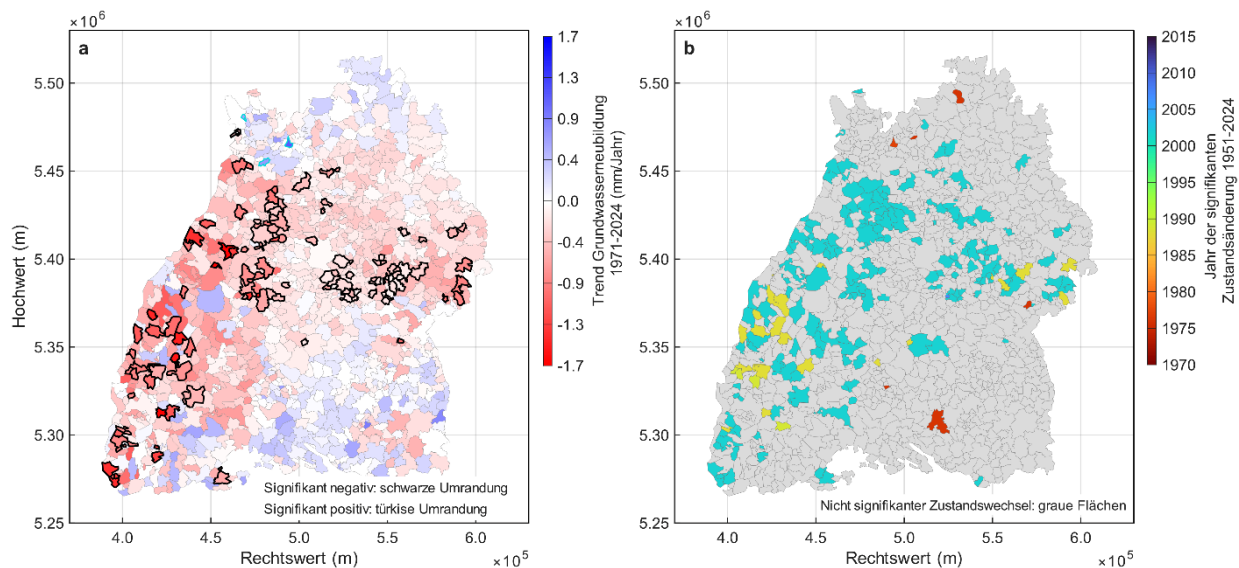


Abbildung 6: Räumliche Verteilung von Trends (1971–2024) und sprunghaften Änderungen (1951–2024) der Grundwasserneubildung auf Gemeindeebene in Baden-Württemberg. (a) Lineare Trends der Grundwasserneubildung (mm/Jahr): Rote Farben kennzeichnen eine Abnahme, blaue Farben eine Zunahme. Gemeinden mit statistisch signifikanten Trends (Mann-Kendall-Test, $p < 0.05$) sind umrandet dargestellt; schwarze Umrandungen markieren signifikante Abnahmen, türkisfarbene Umrandungen signifikante Zunahmen. (b) Jahr einer signifikanten sprunghaften Änderung der Grundwasserneubildung, mit einer Häufung signifikanter Änderungen in den frühen 2000er Jahren, bestimmt mit dem Pettitt-Test ($p < 0.05$). Gemeinden ohne signifikante Änderung sind grau dargestellt.

Die räumlichen Muster der Trends und Zustandsänderungen sind konsistent mit den zuvor dargestellten Veränderungen der klimatischen Wasserbilanz. Da die Grundwasserneubildung eng an den Wasserverfügbarkeit aus Niederschlag minus Verdunstung gekoppelt ist, führen steigende Verdunstungsraten bei gleichzeitig variablen Niederschlägen zu einer Verringerung der für Versickerung verfügbaren Wassermenge. Regionen mit besonders ungünstigem Zusammenspiel dieser Faktoren zeigen daher häufiger eine abnehmende Grundwasserneubildung.

Die Karten verdeutlichen, dass sich die Veränderungen des Wasserhaushalts räumlich differenziert über das Land verteilen, gleichzeitig jedoch große Teile Baden-Württembergs von langfristigen Veränderungen betroffen sind.

Die kombinierte Betrachtung von Trends und sprunghaften Zustandsänderungen ermöglicht eine weitergehende Einordnung dieser räumlichen Veränderungen (**Abbildung 7**). Gemeinden ohne signifikante Trends und ohne signifikante Zustandsänderungen sind grau dargestellt. In zahlreichen Gemeinden treten jedoch statistisch signifikante Veränderungen auf, die entweder als monotone Trends, als strukturelle Brüche oder als Kombination beider Signale auftreten.

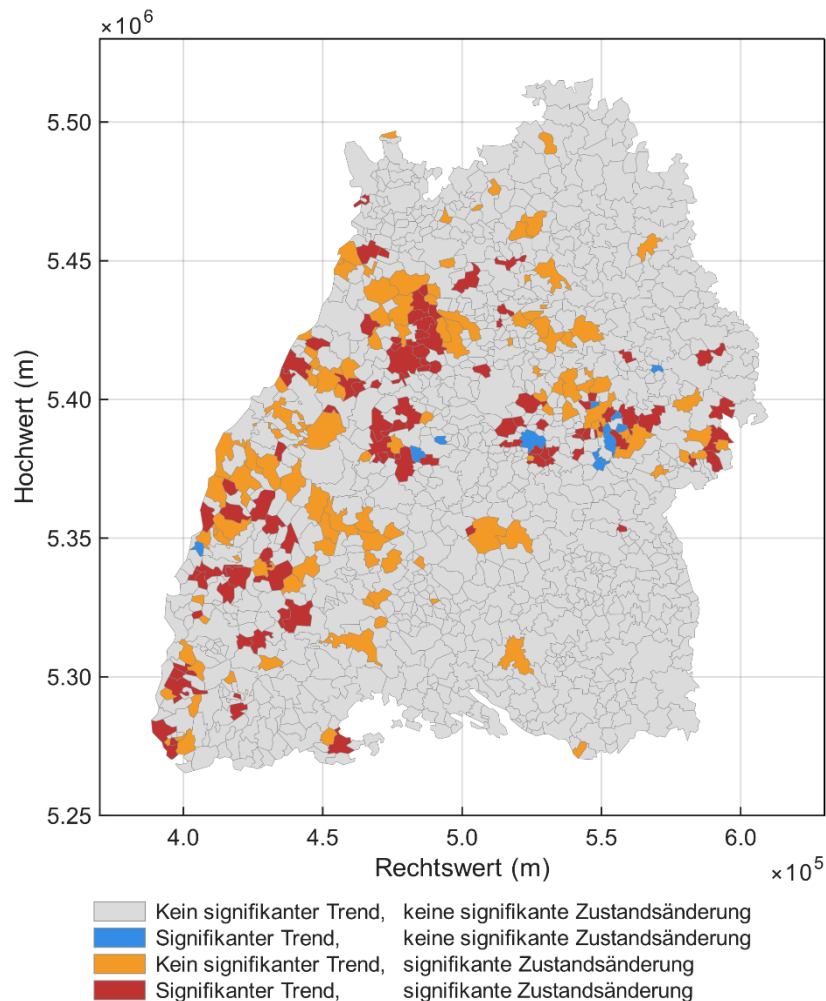


Abbildung 7: Räumliche Synthese signifikanter Trends (1971–2024) und signifikanter sprunghafter Änderungen (1951–2024) der Grundwasserneubildung auf Gemeindeebene in Baden-Württemberg. Graue Flächen kennzeichnen Gemeinden ohne signifikanten Trend und ohne signifikante Änderung. Blaue Flächen zeigen Gemeinden mit signifikantem Trend, jedoch ohne signifikante sprunghafte Änderung. Orange Flächen markieren Gemeinden ohne signifikanten Trend, aber mit signifikanter sprunghafter Änderung. Rote Flächen kennzeichnen Gemeinden, in denen sowohl ein signifikanter Trend als auch eine signifikante sprunghafte Änderung vorliegt.

In mehreren Regionen zeigen die Zeitreihen signifikante Zustandsänderungen ohne gleichzeitig nachweisbaren langfristigen Trend. Dies deutet darauf hin, dass sich das hydrologische System dort eher durch abrupte Verschiebungen des mittleren Zustands als durch kontinuierliche Entwicklungen verändert hat. In anderen Gemeinden treten signifikante Trends ohne sprunghafte Änderungen auf, was auf eine eher graduelle Veränderung der Grundwasserneubildung hindeutet.

Besonders aufschlussreich sind die Veränderungen für Gemeinden, in denen sowohl ein signifikanter Trend als auch eine signifikante Zustandsänderung auftreten. Diese Kombination weist darauf hin, dass sich dort sowohl das mittlere Niveau als auch die zeitliche Entwicklung der Grundwasserneubildung verändert haben. Die räumliche Konzentration dieser kombinierten Signale in mehreren Regionen unterstreicht, dass sich die Transformation des Wasserhaushalts nicht gleichmäßig, sondern regional differenziert vollzieht.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass Veränderungen der Grundwasserneubildung sowohl kontinuierlich als auch in Form abrupter Zustandsänderungen auftreten können. Beide Prozesse tragen gemeinsam zur beobachteten Transformation des regionalen Wasserhaushalts bei.

3 Einordnung im Kontext des Wasserbedarfs

Die Größenordnung der beobachteten Veränderungen lässt sich durch einen Vergleich mit dem aktuellen Wasserbedarf in Baden-Württemberg einordnen. Im Jahr 2022 wurden im Land rund 2.9 Milliarden m³ Wasser genutzt, davon etwa 700 Millionen m³ für die öffentliche Trinkwasserversorgung (LUBW, 2024). Der überwiegende Teil entfällt dabei auf Kühl- und Produktionswasser, während die Trinkwasserversorgung mengenmäßig einen deutlich kleineren, aber für die Daseinsvorsorge entscheidenden Anteil ausmacht.

Unter der vereinfachenden Annahme einer flächenproportionalen Skalierung ergibt sich für Baden-Württemberg eine klimawandelbedingte Abnahme der terrestrischen Wasserspeicherung von etwa 130 bis 170 Millionen m³ pro Jahr. Diese beschreibt ein strukturelles Ungleichgewicht im Wasserhaushalt, bei dem langfristig weniger Wasser neu gespeichert wird, als durch Abfluss und Verdunstung das System verlässt.

Damit erreichen die Veränderungen eine Dimension, die für die öffentliche Wasserversorgung unmittelbar relevant ist. Da rund 70 % des Trinkwassers aus Grund- und Quellwasser gewonnen werden, wirken sich Veränderungen der Grundwasserneubildung direkt auf die Versorgungssituation aus (LUBW, 2024). Gleichzeitig zeigt der Anteil von etwa 55 % Gruppen- und Fernwasserversorgung, dass lokale Defizite bereits heute durch überregionale Verbundsysteme ausgeglichen werden.

Daraus wird deutlich, dass die beobachteten Veränderungen nicht nur hydrologisch relevant sind, sondern bereits heute strukturelle Anpassungen im Versorgungssystem erfordern. Die zunehmende Bedeutung überregionaler Ausgleichsmechanismen weist darauf hin, dass Wasserverfügbarkeit zunehmend zu einem raumstrukturierenden Faktor wird.

Vor diesem Hintergrund gewinnt die Integration wasserwirtschaftlicher Belange in die Landesplanung an Bedeutung. Die Sicherung der Wasserversorgung betrifft nicht nur die Erschließung und Nutzung lokaler Ressourcen, sondern auch die räumliche Steuerung von Wassergewinnung, -transport und -verbrauch sowie die Minimierung von Nutzungskonflikten. Die beobachteten Veränderungen im Wasserhaushalt liefern damit eine empirische Grundlage für die im Landesentwicklungsplan formulierten Anforderungen an eine vorausschauende Sicherung der Wasserversorgung.

4 Schlussfolgerungen und Handlungsfelder

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass sich zentrale Komponenten des Wasserhaushalts in Baden-Württemberg in den vergangenen Jahrzehnten systematisch verändert haben. Die Analysen weisen darauf hin, dass nicht in erster Linie eine Abnahme des Niederschlags, sondern eine zunehmende Verdunstung der zentrale Treiber dieser Entwicklung ist. Selbst bei gleichbleibendem Niederschlag verringert sich dadurch die klimatische Wasserverfügbarkeit, die für Böden, Vegetation und Grundwasserneubildung zur Verfügung steht. Aufgrund der engen Kopplung zwischen Wasserbilanz und Grundwasserneubildung führt diese Entwicklung langfristig zu einer Abnahme der verfügbaren

Wasserressourcen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nicht die gesamte im Wasserkreislauf umgesetzte Wassermenge betroffen ist, sondern insbesondere der langfristig verfügbare und nutzbare Anteil, der für Grundwasserneubildung und Wasserversorgung entscheidend ist.

Der Wasserhaushalt Baden-Württembergs hat sich damit von einem primär niederschlagsgetriebenen zu einem stärker durch die Energieverfügbarkeit (Lufttemperatur und Verdunstung) gesteuerten System verschoben. Die steigende atmosphärische Verdunstungsnachfrage verschiebt das Gleichgewicht schrittweise in Richtung geringerer Wasserverfügbarkeit und wirkt sich unmittelbar auf Grundwasserneubildung und terrestrische Wasserspeicherung aus. Dieses Signal ist über verschiedene hydrologische Komponenten hinweg konsistent und weist auf eine dominante klimatische Steuerung hin, deren regionale Ausprägung durch landschaftliche und hydrologische Unterschiede moduliert wird. Diese Einordnung steht im Einklang mit aktuellen Einschätzungen der KLIWA-Kooperation, die darauf hinweisen, dass beobachtete Lufttemperatur- und Niederschlagsentwicklungen in den letzten Jahren teilweise am oberen Rand der projizierten Veränderungen liegen und daher eine kontinuierliche Überprüfung und Anpassung wasserwirtschaftlicher Planungsgrundlagen erforderlich ist (KLIWA, 2023b).

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Herausforderungen für das Wassermanagement weniger in einzelnen Maßnahmen als in einer strukturellen Verschiebung des Wasserhaushalts liegen. Der Wasserhaushalt lässt sich dabei als Versorgungssystem beschreiben, in dem Niederschlag das Angebot, Verdunstung die Verluste und Grundwasserneubildung sowie Abfluss die verfügbaren Ressourcen darstellen. Die beobachteten Veränderungen zeigen, dass sich dieses System zunehmend in Richtung geringerer Nettoverfügbarkeit verschiebt. Anpassungsmaßnahmen können diese Entwicklung abmildern, ihre Wirksamkeit bleibt jedoch an die zugrunde liegende klimatische Entwicklung gebunden. Vor diesem Hintergrund ergeben sich zentrale Handlungsfelder für Klimaschutz, Wasserbewirtschaftung und Landesplanung:

Erstens ist konsequenter Klimaschutz eine zentrale Voraussetzung, um die weitere Verschärfung der beschriebenen Entwicklungen zu begrenzen. Eine Begrenzung der Erwärmung wirkt direkt auf die Verdunstungsdynamik und damit auf die klimatische Wasserbilanz, die den Wasserhaushalt maßgeblich steuert.

Zweitens gewinnt die Fähigkeit der Landschaft, Wasser zu speichern und zurückzuhalten, weiter an Bedeutung. Ansätze wie die Zukunftsstrategie Wasser und Boden (UM BW, 2023) sowie Maßnahmen zur Förderung von Schwammstädten und Schwammlandschaften schaffen hierfür eine wichtige Grundlage. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass Speicher- und Rückhaltemaßnahmen strukturelle Defizite der Wasserbilanz nicht kompensieren, sondern vor allem zeitliche Ungleichgewichte ausgleichen können.

Drittens erfordert die enge Kopplung zwischen klimatischer Wasserbilanz und Grundwasserneubildung ein vorausschauendes und räumlich differenziertes Grundwassermanagement. Vor dem Hintergrund der beobachteten Verschiebung hin zu einer stärker verdunstungsgetriebenen Wasserbilanz kommt der Sicherung der Grundwasserneubildung eine Schlüsselrolle für die langfristige Wasserverfügbarkeit zu. Mit dem Masterplan Wasserversorgung Baden-Württemberg (UM BW, 2022a) bestehen hierfür wichtige Ansätze. Angesichts regional stark variierender Entwicklungen und einer überwiegend dezentral organisierten Wasserversorgung mit zahlreichen lokalen Versorgern wird es

erforderlich, regionale Unterschiede stärker zu berücksichtigen, Entnahme- und Versickerungsgebiete langfristig zu sichern und die Abstimmung zwischen Wasserangebot und Nutzung weiterzuentwickeln.

Viertens ist das Wassermangelmanagement von einer überwiegend reaktiven hin zu einer vorsorgenden, indikatorgestützten Steuerung weiterzuentwickeln wie in Schmidt et al. (2025) beschrieben. Dazu zählen insbesondere der Ausbau redundanter Versorgungssysteme, die stärkere Vernetzung von Versorgungsgebieten sowie die Sicherstellung der Wasserversorgung auch unter Bedingungen von Trockenperioden und erhöhtem Bedarf. Die zunehmende Bedeutung überregionaler Verbundsysteme zeigt, dass strukturelle Veränderungen der Wasserverfügbarkeit bereits heute wirksam sind. Gleichzeitig ist eine stärkere Verknüpfung mit bestehenden Instrumenten des Hochwasser- (UM BW, 2021) und Starkregenmanagements (UM BW, 2022b) erforderlich, um Wasserüberschuss und Wasserknappheit integriert zu betrachten, denn es ist davon auszugehen, dass neben Wassermangellagen auch Extremereignisse wie Starkregen und Hochwasser an Bedeutung gewinnen.

Fünftens ist zu erwarten, dass zunehmende Wasserknappheit zu Nutzungskonflikten zwischen verschiedenen Sektoren führen wird. Instrumente der Landesplanung bieten hierfür eine zentrale Grundlage. Die im Eckpunktepapier zur Fortschreibung des Landesentwicklungsplans formulierten Ziele zur Sicherung der Wasserversorgung und zum Umgang mit Wasserextremen unterstreichen die wachsende Bedeutung wasserbezogener Belange in der räumlichen Planung (MLW BW, 2023). Vor diesem Hintergrund wird es erforderlich, klimatische Wasserverfügbarkeit und verfügbare Wasserressourcen systematisch in die fachlichen Grundlagen und Bewertungsmaßstäbe der Landesplanung zu überführen. Wasser entwickelt sich dabei zunehmend zu einer raumwirksamen und potenziell raumstrukturierenden Ressource, die in der räumlichen Steuerung von Flächennutzung, Infrastrukturentwicklung und Nutzungskonflikten berücksichtigt werden muss.

Die Abnahme der klimatischen Wasserverfügbarkeit und die damit verbundene Zunahme trockener Sommerjahre führen zu Nutzungskonflikten, zum Beispiel zwischen

- öffentlicher Trinkwasserversorgung und landwirtschaftlicher Bewässerung,
- ökologischen Mindestabflüssen und wassergebundenen Nutzungen,
- landwirtschaftlicher Nutzung und dem Schutz von Grundwasserqualität und -neubildung,
- Siedlungsentwicklung und Sicherung von Retentionsflächen sowie Grundwasserneubildungsgebieten.

Diese Nutzungskonflikte machen deutlich, dass Wasser künftig nicht nur als Umweltfaktor, sondern als begrenzende Ressource mit unmittelbarer Steuerungswirkung für räumliche Entwicklung zu betrachten ist.

Sechstens ist sicherzustellen, dass kommunale Klimaanpassung systematisch Fragen der Wasserverfügbarkeit, der Grundwasserentwicklung und möglicher Nutzungskonflikte integriert. Gleichzeitig sind Datengrundlagen, Bewertungsmaßstäbe und die öffentliche Kommunikation zur Wasserverfügbarkeit weiterzuentwickeln und zu vereinheitlichen, um eine belastbare Grundlage für Planung, Steuerung und gesellschaftliche Abstimmungsprozesse zu schaffen. Dies umfasst auch eine stärkere Verknüpfung zwischen kommunaler Planung sowie wasserwirtschaftlichen und landesplanerischen Strategien.

Baden-Württemberg verfügt bereits über eine Reihe strategischer Ansätze und Instrumente, um auf die beschriebenen Veränderungen zu reagieren. Entscheidend wird jedoch sein, diese Maßnahmen konsequent umzusetzen, besser miteinander zu verknüpfen und fortlaufend an aktuelle Beobachtungsdaten anzupassen. Die Kombination aus wirksamem Klimaschutz, datenbasierter Weiterentwicklung der Strategien und gezielten Anpassungsmaßnahmen wird maßgeblich dafür sein, die langfristige Verfügbarkeit von Wasser für Bevölkerung, Wirtschaft und Ökosysteme zu sichern.

5 Datenquellen

5.1 Terrestrische Wasserspeicherung

Die terrestrische Wasserspeicherung (TWS) wurde aus zeitlichen Variationen des Erdschwerefeldes abgeleitet, die durch die GRACE- und GRACE-FO-Satelliten (GFZ GravIS) gemessen wurden. Sie beschreibt die integrierte Änderung der gesamten terrestrischen Wassermasse, einschließlich Bodenfeuchte, Grundwasser, Schnee, Eis und Oberflächenwasser.

GFZ (Helmholtz-Zentrum für Geoforschung) GravIS, 2025. GravIS Terrestrial Water Storage Anomaly Level-3 Products. Abrufbar unter: <https://isdc-data.gfz.de/grace/GravIS/GFZ/Level-3/TWS/> (Zugriff am 09.03.2026)

5.2 Gebietsniederschlag

Der Gebietsniederschlag basiert auf flächengewichtet gemittelten Monatswerten des Climate Data Center (CDC) des Deutschen Wetterdienstes (DWD), die aus qualitätskontrollierten Stationsdaten interpoliert werden.

DWD-CDC (Climate Data Center des Deutschen Wetterdienstes), 2026. Monatliche Gebietsmittel des Niederschlags für den Zeitraum 1881-2025. Abrufbar unter: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/regional_averages_DE/monthly/precipitation/ (Zugriff am 12.02.2026)

5.3 Verdunstung

Die Verdunstung wird als modellierte tatsächliche Verdunstung (V) aus dem ERA5-Land-Datensatz verwendet, die Bodenverdunstung, Transpiration, Interzeptionsverdunstung sowie Beiträge von offenen Wasserflächen und Schnee umfasst.

CDS (Climate Data Store, copernicus), 2026. ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present – Total evaporation. Abrufbar unter: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land-monthly-means?tab=download> (Zugriff am 09.03.2026)

5.4 Abfluss

Der Abfluss basiert auf monatlichen Pegeldata, die aus beobachteten Durchflussmessungen hydrologisch repräsentativer Einzugsgebiete abgeleitet und im Global Runoff Data Centre (GRDC) verfügbar gemacht werden.

GRDC (Global Runoff Data Centre), 2026. Monthly discharge data for subregions. Abrufbar unter: https://grdc.bafg.de/data/data_portal/ (Zugriff am 13.03.2026)

Zur quantitativen Einordnung der klimatischen Steuerung des Abflusses wurden normierte Jahres- und Halbjahresmittel der Pegelabflüsse mit der klimatischen Wasserbilanz regressiert. Die Auswertung erfolgte getrennt für Jahresmittel sowie für Winter- und Sommerhalbjahr auf Basis konsistenter Zeitreihen. Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit wurden die Abflussdaten normiert und nur Jahre mit vollständiger Datenverfügbarkeit berücksichtigt.

5.5 Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildungsdaten basieren auf den von der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) für die Gemeindeebene bereitgestellten Daten. Die Werte werden modellgestützt aus Wasserhaushaltsansätzen abgeleitet und berücksichtigen Niederschlag, Verdunstung sowie Boden- und Standorteigenschaften. Sie ermöglichen eine räumlich differenzierte Analyse langfristiger Entwicklungen der Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg.

LUBW (Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg), 2026. Grundwasserneubildung. Aggregierte Daten pro Gemeinde. Abrufbar unter: <https://umweltdaten.lubw.baden-wuerttemberg.de/> (Zugriff am 11.02.2026)

5.6 Landnutzungsänderungen

Mögliche dominante Einflüsse von Landnutzungsänderungen in Baden-Württemberg auf die mittleren Wasserhaushaltsgrößen wurde durch CORINE Land Cover Change-Daten, die für die vier Zeiträume 1990–2000, 2000–2006, 2006–2012 und 2012–2018 vorliegen, überprüft.

Copernicus, 2026. CORINE Land Cover. Abrufbar unter: <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover> (Zugriff am 02.04.2026)

6 Methodik

Die Analyse der Veränderungen des Wasserhaushalts in Baden-Württemberg basiert auf der Auswertung langfristiger Zeitreihen zentraler hydrologischer und klimatischer Größen. Betrachtet wurden Gebietsniederschlag, tatsächliche Verdunstung, klimatische Wasserbilanz, Grundwasserneubildung sowie Abflussdaten repräsentativer Pegel. Ergänzend wurden satellitengestützte Daten der terrestrischen Wasserspeicherung einbezogen, um großräumige Entwicklungen des Wassersystems zu erfassen.

Um die Vergleichbarkeit der Zeitreihen zu gewährleisten, wurden alle Daten einheitlich aufbereitet und auf konsistente Zeiträume aggregiert. Zur Analyse langfristiger Veränderungen wurden die Zeitreihen normiert und als Abweichungen von einem langjährigen Referenzzustand dargestellt. Zusätzlich erfolgte eine getrennte Betrachtung von Jahreswerten sowie saisonalen Mittelwerten (Sommerhalbjahr April–September, Winterhalbjahr Oktober–März), um Veränderungen im saisonalen Wasserhaushalt sichtbar zu machen.

Die statistische Auswertung zielt darauf ab, sowohl kontinuierliche Entwicklungen als auch abrupte Änderungen im Wasserhaushalt zu identifizieren. Dazu wurden robuste, nichtparametrische Verfahren eingesetzt, die keine Annahmen über die Verteilung der Daten erfordern und unempfindlich gegenüber Ausreißern sind.

Zur Quantifizierung der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Komponenten des Wasserhaushalts wurden lineare Regressionsanalysen durchgeführt. Insbesondere wurde untersucht, in welchem Maße die Grundwasserneubildung durch die klimatische Wasserbilanz aus Niederschlag minus Verdunstung erklärt werden kann.

Für räumliche Analysen wurden die Zeitreihen der Grundwasserneubildung auf Gemeindeebene ausgewertet. Dabei wurden sowohl langfristige Trends als auch signifikante sprunghafte Änderungen bestimmt und kartographisch dargestellt, um regionale Unterschiede in der Entwicklung des Wasserhaushalts sichtbar zu machen.

6.1 Lückenfüllung in der Zeitreihe der terrestrischen Wasserspeicherung

Fehlende Monatswerte in der TWS-Zeitreihe wurden durch Rekonstruktion der saisonalen und langfristigen Signalanteile ergänzt. Dazu wurden (1) eine klimatologische Monatsmittelmethode, (2) eine Kombination aus Trend und saisonaler Klimatologie, (3) ein harmonisches Regressionsmodell (Fourier-Ansatz) sowie (4) eine rein datengetriebene Interpolation (Makima, 1970) angewendet. Die finale Zeitreihe basiert auf der Fourier-basierten Rekonstruktion, die sowohl Trend als auch saisonale Variabilität konsistent berücksichtigt.

6.2 Theil-Sen-Schätzer

Die Stärke eines monotonen Trends wurde mit dem Theil-Sen-Schätzer bestimmt. Dieser berechnet sich als Median aller Steigungen zwischen paarweise gebildeten Datenpunkten und liefert eine robuste Schätzung der Trendrate, die weitgehend unempfindlich gegenüber Ausreißern ist und keine Normalverteilung voraussetzt (Sen, 1968; Theil, 1992).

6.3 Mann-Kendall-Test

Mit dem nichtparametrischen Mann-Kendall-Test wurde geprüft, ob in einer monotonen Trendkomponente einer Zeitreihe eine systematische Zu- oder Abnahme vorliegt, ohne Annahmen über die Verteilung der zugrundeliegenden Daten zu treffen (Mann, 1945; Kendall, 1948).

6.4 Pettitt-Test

Mögliche sprunghafte Änderungen oder Strukturbrüche im Zeitreihenverlauf wurden mit dem Pettitt-Test identifiziert (Pettitt, 1979). Dabei handelt es sich um ein nichtparametrisches Verfahren, das auf Rangstatistiken basiert und den wahrscheinlichsten Zeitpunkt eines abrupten Wechsels im Median einer Zeitreihe bestimmt.

7 Quellenverzeichnis

Bisselink B, Dolman AJ, 2008. Precipitation Recycling: Moisture Sources over Europe using ERA-40 Data. *Journal of Hydrometeorology* 9, 1073–1083. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1175/2008JHM962.1>

Conradt T, Engelhardt H, Menz C, Vicente-Serrano SM, Farizo BA, Peña-Angulo D, Domínguez-Castro F, Eklundh L, Jin H, Boincean B, Murphy C, López-Moreno JI, 2023. Cross-sectoral impacts of the 2018–2019 Central European drought and climate resilience in the German part of the Elbe River basin. *Regional Environmental Change* 23, 32. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1007/s10113-023-02032-3>

Copernicus, 2026. CORINE Land Cover. Abrufbar unter: <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover> (Zugriff am 02.04.2026)

Crapart C, Anquetin S, Blanchet J, Diedhiou A, 2026. Global projections of aridity index for mid and long-term future based on CMIP6 scenarios. *Hydrology and Earth System Sciences* 30, 163–181. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.5194/hess-30-163-2026>

Dahle C, Boergens E, Sasgen I, Döhne T, Reißland S, Dobsław H, Klemann V, Murböck M, König R, Dill R, Sips M, Sylla U, Groh A, Horwath M, Flechtner F, 2025. GravIS: mass anomaly products from satellite gravimetry. *Earth System Science Data* 17, 611–631. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.5194/essd-17-611-2025>

Fohrer N, Bormann H, Miegel K, Casper M, Bronstert A, Weiler M, 2026. *Hydrologie*, 2. korr. Aufl. (utb basics). UTB-Verlag.

Güntner A, Gerdener H, Boergens E, Kusche J, Kollet S, Dobsław H, Hartick C, Sharifi E, Flechtner F, 2023. Veränderungen der Wasserspeicherung in Deutschland seit 2002 aus Beobachtungen der Satellitengravimetrie. *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung* 67, 74–89. Abrufbar unter: https://doi.org/10.5675/HyWa_2023.2_1

Kendall MG, 1948. *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin, London.

Kleidon A, 2024. Dürren in Deutschland: Warum der Klimawandel hydrologische Extreme verstärkt. *Physik in unserer Zeit* 55, 190–197. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1002/piuz.202401697>
<https://doi.org/10.1002/piuz.202401697>

KLIWA (Kooperation Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft), 2023a. Positionspapier der Kooperation KLIWA – Aussagen zur Grundwasserneubildung auf Basis regionaler Klimaprojektionen im Kontext Wasserversorgung. Abrufbar unter: https://www.kliwa.de/download/KLIWA-Positionspapier-2023_Aussagen_Grundwasserneubildung_auf_Basis_regionaler_Klimaprojektionen_HyWa-Heft-5-2023.pdf (Zugriff am 07.04.2026)

KLIWA (Kooperation Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft), 2023b. Einordnung der Ergebnisse des KLIWA-Ensembles in die aktuelle klimatische Entwicklung. – Positionspapier zur Verwendung in der Wasserwirtschaft. Abrufbar unter: https://www.kliwa.de/download/KLIWA-Positionspapier-2023_Einordnung_Klimaprojektionen_aktuelle_Entwicklung.pdf (Zugriff am 07.04.2026)

Krug A, Aemisegger F, Sprenger M, Ahrens B, 2022. Moisture sources of heavy precipitation in Central Europe in synoptic situations with Vb-cyclones. *Climate Dynamics* 59, 3227–3245. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06256-7>

LUBW (Landesanstalt für Umwelt), 2024. Umweltdaten Bericht 2024. Wasserbedarf: Eingespart wird vor allem in der Wirtschaft. Abrufbar unter: <https://umweltportal.baden-wuerttemberg.de/umweltdaten-bericht-2024/wasserbedarf> (Zugriff am 07.04.2026)

Makima H, 1970. A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures. *Journal of the ACM (JACM)* 17, 589–602. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1145/321607.321609>

Mann HB, 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society* 13, 245–259. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.2307/1907187>

MLW BW (Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg), 2023. Raum für morgen. Eckpunkte für den Landesentwicklungsplan Baden-Württemberg. Abrufbar unter: <https://img.mlw.oneba.se/s5B790Nx0V4ahlKiFqh-pAO3NXQvFw6UHvSb2WqiBqS6k=/https://www.landesentwicklung-bw.de/img/stream/content/downloads/lep-raum-fuer-morgen-eckpunktepapier.pdf,p15> (Zugriff am 07.04.2026)

MLW BW (Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg), 2024. Sicherung der Wasserversorgung. Abrufbar unter: <https://www.landesentwicklung-bw.de/de/mitmachen/beteiligungen/eckpunktepapier-zum-lep/thema/sicherung-der-wasserversorgung> (Zugriff am 07.04.2026)

Pettitt AN, 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)* 28, 126–135. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.2307/2346729>

Savary O, Ardilouze C, Cattiaux J, 2026. Linking European droughts to year-round weather regimes. *Weather and Climate Dynamics* 7, 223–245. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.5194/wcd-7-223-2026>

Schmidt M, Schindler D, Arneth A, Kesselring S, Löbbe S, Pehnt M, 2025. Stellungnahme gemäß § 16 Absatz 2 KlimaG BW zum Monitoringbericht 2025 zur Anpassungsstrategie Baden- Württemberg. Abrufbar unter: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Datien/Dokumente/4_Klima/Klimaschutz/Klima-Sachverstaendigenrat/250214-K-SVR-Stellungnahme-Monitoringbericht-2025-zur-Anpassungsstrategie-BW.pdf (Zugriff am 07.04.2026)

Sen PK, 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association* 63, 1379–1389. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.2307/2285891>

Staal A, Meijer P, Nyasulu MK, Tuinenburg OA, Dekker SC, 2025. Global terrestrial moisture recycling in Shared Socioeconomic Pathways. *Earth System Dynamics* 16, 215–238. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.5194/esd-16-215-2025>

Stala (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg), 2025. Wasserversorgung 2022 in Baden-Württemberg: Lokale Wasservorkommen reichen vielerorts nicht aus. Abrufbar unter: <https://www.statistik-bw.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/wasserversorgung-2022->

[in-baden-wuerttemberg-lokale-wasservorkommen-reichen-vielerorts-nicht-aus](#) (Zugriff am 07.04.2026)

Theil H, 1992. A Rank-Invariant Method of Linear and Polynomial Regression Analysis. In: Raj, B., Koerts, J. (eds) Henri Theil's Contributions to Economics and Econometrics. Advanced Studies in Theoretical and Applied Econometrics, vol 23. Springer, Dordrecht. Abrufbar unter:

https://doi.org/10.1007/978-94-011-2546-8_20

UM BW (Umweltministerium Baden-Württemberg), 2021. Hochwasserrisikomanagement in Baden-Württemberg. Abrufbar unter: <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/umwelt-natur/wasser/hochwasser> (Zugriff am 07.04.2026)

UM BW (Umweltministerium Baden-Württemberg), 2022a. Masterplan Wasserversorgung. Abrufbar unter: <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/umwelt-natur/wasser/wasser-und-klimawandel/masterplan-wasserversorgung> (Zugriff am 07.04.2026)

UM BW (Umweltministerium Baden-Württemberg), 2022b. Starkregen. Abrufbar unter: <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/umwelt-natur/wasser/starkregen> (Zugriff am 07.04.2026)

UM BW (Umweltministerium Baden-Württemberg), 2023. Zukunftsstrategie Wasser und Boden. Abrufbar unter: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Datien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/Zukunftsstrategie-Wasser-und-Boden.pdf (Zugriff am 07.04.2026)

Van der Ent RJ, Savenije HH, Schaefli B, Steele-Dunne SC, 2010. Origin and fate of atmospheric moisture over continents. Water Resources Research 46, W09525. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1029/2010WR009127>

Yao M, Tang H, Huang G, 2026. Persisting modulation of Interdecadal Pacific Oscillation on near-future winter precipitation projections in northern Europe. Geophysical Research Letters 53, e2025GL119484. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1029/2025GL119484>

MEHR INFORMATIONEN

Klima-Sachverständigenrat Baden-Württemberg
Kernerplatz 9 · 70182 Stuttgart
E-Mail: klima-sachverstaendigenrat@um.bwl.de



KLIMA-SACHVERSTÄNDIGENRAT
BADEN-WÜRTTEMBERG