

IMPULSPAPIER

Klimawandelbedingte Veränderungen der Umwelt- und Lebensbedingungen in Baden-Württemberg

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

STAND

06.07.2026



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

Dieses Impulspapier 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): Dr. Rafael Labanino

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

Zusammenfassung

Der klimatische Lebensraum Baden-Württembergs befindet sich in einem tiefgreifenden systemischen Wandel. Mit der langfristigen, klimawandelbedingten Erwärmung nehmen Hitzebelastungen und feucht-warme Bedingungen zu, biologische Entwicklungszyklen verschieben sich und frostgeprägte Winterbedingungen gehen zurück (**Abbildung 1**).

Mehrere unabhängige Datengrundlagen belegen diese Entwicklung eindrücklich. Auffällig ist die zeitliche Abfolge von Zustandsänderungen seit den späten 1980er und frühen 2000er Jahren, die sich konsistent in meteorologischen, hydrologischen und biologischen Größen zeigt.

Die beobachteten Entwicklungen betreffen wesentliche Voraussetzungen für Gesundheit, Wohlbefinden und Lebensqualität der Menschen in Baden-Württemberg. Sie beeinflussen die thermische Belastung des Menschen, die Wasserverfügbarkeit, die Funktionsfähigkeit von Ökosystemen sowie die Anpassungsfähigkeit von Infrastruktur und Gesellschaft. Besonders betroffen sind ältere Menschen, Kinder, Personen mit Vorerkrankungen und Menschen mit hoher klimatischer Exposition.

Die bereits heute sichtbaren Veränderungen unterstreichen erneut die Notwendigkeit einer konsequenten Vermeidung von Treibhausgasemissionen. Denn Anpassungsmaßnahmen können zwar dazu beitragen, die Folgen bereits eingetretener Veränderungen für Gesundheit, Wohlbefinden und Lebensqualität abzumildern. Der langfristige Erhalt gesundheitsförderlicher Umwelt- und Lebensbedingungen erfordert jedoch, die Ursachen des Klimawandels wirksam zu adressieren, was nur über langfristig angelegte und konsequent umgesetzte Klimaschutzmaßnahmen zum Erreichen einer treibhausgasneutralen Wirtschaft und Gesellschaft möglich ist.

Zentrale Botschaften

1. Der klimatische Lebensraum Baden-Württembergs verändert sich grundlegend

Seit den 1950er Jahren haben sich gesundheitsrelevante Umwelt- und Lebensbedingungen teils deutlich verändert. Baden-Württemberg ist heute wärmer, trockener, feucht-wärmer und deutlich weniger frostgeprägt als noch vor wenigen Jahrzehnten.

2. Die stärksten Veränderungen setzen in den späten 1980er Jahren ein

Mehrere unabhängige Größen zeigen eine zeitliche Abfolge grundlegender Zustandsänderungen: zunächst die langfristige, klimawandelbedingte Erwärmung seit den späten 1980er Jahren, anschließend die zunehmende Belastung durch Hitze, später häufiger auftretende warme und feucht-warme Nächte.

3. Hitze, Trockenheit und Feuchte wirken zunehmend gemeinsam

Neben der steigenden Lufttemperatur nehmen auch kombinierte Hitze-Trockenheitsbelastungen und feucht-warme Bedingungen zu. Dadurch verändern sich die Voraussetzungen für Wasserverfügbarkeit, menschliche Thermoregulation und die Anpassungsfähigkeit von Ökosystemen gleichzeitig.

4. Biologische Systeme reagieren messbar und sichtbar auf den Klimawandel

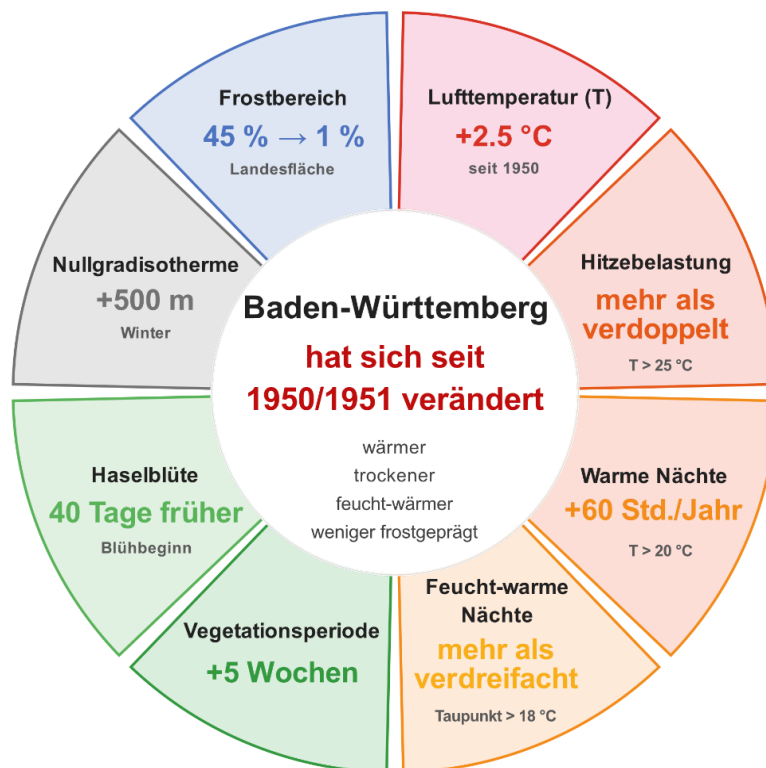
Frühere Blüh- und Austriebszeitpunkte sowie längere Vegetationsperioden zeigen, dass die klimatischen Veränderungen bereits heute mess- und sichtbare Auswirkungen auf die biologische Umwelt haben.

5. Der Schutz gesundheitsfördernder Lebensbedingungen beginnt beim Klimaschutz

Anpassungsmaßnahmen werden zunehmend notwendig, um die Folgen der bereits eingetretenen Veränderungen zu begrenzen. Die beobachteten Entwicklungen verdeutlichen jedoch, dass die langfristige Stabilisierung gesundheitsrelevanter Umwelt- und Lebensbedingungen nur durch eine tiefgreifende, konsequente Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen erreicht werden kann.

Klimawandelbedingte Veränderungen in Baden-Württemberg

Ausgewählte langfristige Veränderungen umwelt- und gesundheitsrelevanter Größen



Kennzahlen aus langfristigen Veränderungen geglätteter Zeitreihen bzw. abgeleiteter Flächenanteile

Abbildung 1: Ausgewählte klimawandelbedingte Veränderungen gesundheitsrelevanter Umwelt- und Lebensbedingungen in Baden-Württemberg. Die Kennzahlen basieren auf den langfristigen Veränderungen von Temperatur-, Feuchte-, Vegetations- und Frostindikatoren für den Zeitraum 1950/1951 bis 2024/2025. Die Ergebnisse zeigen eine Entwicklung hin zu wärmeren, trockeneren, feucht-wärmeren und weniger frostgeprägten Umweltbedingungen.

Anmerkung: Die Nullgradisotherme beschreibt jene Höhenlage, in der die mittlere Winterlufttemperatur (Dezember, Januar, Februar) 0 °C beträgt. Sie kann als klimatische Grenze zwischen überwiegend frost- und tauwettergeprägten Winterbedingungen interpretiert werden. Der Frostbereich ist der Anteil der Landesfläche, der oberhalb der Nullisotherme liegt.

1 Einleitung

Gesundheit wird nicht allein durch die medizinische Versorgung bestimmt. Sie entsteht im Zusammenwirken natürlicher, sozialer und gebauter Lebensräume. Deren Umwelt- und Lebensbedingungen prägen, wie Menschen leben, arbeiten und sich erholen. Der Klimawandel greift zunehmend in diese Bedingungen ein. Er verändert thermische Verhältnisse, Wasserverfügbarkeit, Vegetationsentwicklung und die Qualität natürlicher Lebensräume. Darüber hinaus beeinflusst er Determinanten der Gesundheit wie Luftqualität, Ernährungssysteme, Wohnsituationen und Arbeitsbedingungen (Hurrelmann und Richter, 2022; Campbell-Lendrum et al., 2023). Zu einem gesundheitsfördernden Lebensumfeld gehören ebenso soziale und infrastrukturelle Voraussetzungen, die Erholung, körperliche Aktivität und gesellschaftliche Teilhabe ermöglichen (Public Health Scotland, 2023). Gemeinsam bilden diese Faktoren die Umwelt- und Lebensbedingungen, auf denen Gesundheit und Lebensqualität beruhen (Kriit et al., 2026).

Eine zentrale Rolle für Gesundheit spielt dabei die zunehmende Wärmebelastung. Die langfristig durch den Klimawandel steigende Lufttemperatur, häufigere Hitzeereignisse und wärmere Nächte beeinflussen die Möglichkeiten des menschlichen Körpers zur Thermoregulation und nächtlichen Erholung. Besonders während langanhaltender Hitzeperioden können sich Belastungen aufbauen, die das Wohlbefinden beeinträchtigen und gesundheitliche Risiken erhöhen. Gleichzeitig verändert sich die Häufigkeit feucht-warmer Bedingungen, bei denen die natürliche Kühlung des Körpers durch Verdunstung eingeschränkt wird.

Hitze zählt bereits heute zu den bedeutendsten klimawandelbedingten Gesundheitsrisiken und steht mit einer erhöhten Mortalität und Morbidität in Zusammenhang (Rocque et al., 2021; Campbell-Lendrum et al., 2023; arznei-telegramm, 2026). Hitze wirkt dabei nicht isoliert. Sie beeinflusst zugleich Wasserverfügbarkeit, Vegetationsentwicklung sowie die Belastung von Ökosystemen und wird deshalb zunehmend als übergreifender Risikoverstärker verstanden (FAO und WMO, 2026).

Mit der steigenden thermischen Belastung eng verbunden ist in Baden-Württemberg die Wasserverfügbarkeit. Höhere Lufttemperaturwerte verstärken die Verdunstung und verändern dadurch den Wasserhaushalt von Böden, Vegetation und Gewässern (Schmidt et al., 2026).

Wasser erfüllt zahlreiche gesundheitsrelevante Funktionen – von der Sicherung der Trinkwasserversorgung über die Kühlung von Landschaften und Siedlungen bis zur Stabilisierung von Ökosystemen. Eine abnehmende Wasserverfügbarkeit beeinflusst sowohl die Anpassungsfähigkeit des Menschen an zunehmende Hitze als auch die Funktionsfähigkeit natürlicher Lebensräume. Weltweit wird Wasserknappheit zunehmend als eigenständiges Gesundheitsrisiko betrachtet, da sie grundlegende und lebenssichernde Bedürfnisse beeinträchtigt (Ramchandani et al., 2026).

Veränderungen phänologischer Ereignisse und Phasen gehören zu den empfindlichsten biologischen Indikatoren des Klimawandels. Weltweit werden frühere Austriebs-, Blüh- und Entwicklungsphasen bei zahlreichen Pflanzenarten beobachtet (Hassan et al., 2023). Da Pflanzen und Tiere unterschiedlich auf klimatische Veränderungen reagieren, können sich zeitliche Wechselwirkungen zwischen Arten verschieben, beispielsweise zwischen Blüte und Bestäubung oder zwischen Nah-

rungsangebot und Entwicklungszyklen (Lang et al., 2025). Phänologische Veränderungen dokumentieren damit nicht nur die biologische Reaktion auf den Klimawandel, sondern beeinflussen auch die Funktionsfähigkeit von Ökosystemen und die vom Menschen genutzten Umweltleistungen.

Der Klimawandel beeinflusst darüber hinaus zahlreiche weitere gesundheitsrelevante Bereiche, die im vorliegenden Impulspapier nicht behandelt werden. Hierzu gehören Veränderungen der Luftqualität, die Ausbreitung klimaempfindlicher Krankheitserreger und ihrer Überträgerorganismen sowie gesellschaftliche Rahmenbedingungen, die die Anfälligkeit gegenüber klimatischen Belastungen mitbestimmen. Aktuelle Untersuchungen zeigen beispielsweise eine zunehmende klimatische Eignung für verschiedene vektorübertragene Erkrankungen in Europa (Patzina-Mehling et al., 2026) und Veränderungen der Pollensaison (Kriit et al., 2026).

Gesundheitliche Auswirkungen des Klimawandels werden häufig anhand von Erkrankungen, Krankenhausaufenthalten oder Todesfällen beschrieben. Veränderungen gesundheitsrelevanter Umwelt- und Lebensbedingungen treten jedoch bereits lange davor auf und ermöglichen es, gesundheitliche Risiken frühzeitig zu erkennen. Dieser präventive Ansatz folgt dem Verständnis, dass der Klimawandel Gesundheit nicht nur direkt, sondern vor allem über Veränderungen ökologischer und sozialer Determinanten beeinflusst (Atwoli et al., 2021; Campbell-Lendrum et al., 2023; PIK, 2024). Gleichzeitig entspricht er aktuellen Bestrebungen, die Evidenz zu Klima- und Gesundheitswirkungen kontinuierlich auf der Grundlage gesundheitsrelevanter Umweltbedingungen fortzuschreiben (DESTINY, 2025).

Vor diesem Hintergrund untersucht das vorliegende Impulspapier die Veränderungen gesundheitsrelevanter Umwelt- und Lebensbedingungen in Baden-Württemberg. Im Mittelpunkt stehen der langfristige Anstieg der klimawandelbedingten Wärmebelastung, die abnehmende Verfügbarkeit nutzbaren Wassers und die Vegetationsentwicklung in Baden-Württemberg. Ziel ist es nicht, einzelne Erkrankungen oder Gesundheitsfolgen zu quantifizieren, sondern Veränderungen der Umwelt- und Lebensbedingungen zu beschreiben, auf denen Gesundheit, Wohlbefinden und Lebensqualität beruhen.

2 Veränderungen thermischer Umweltbedingungen

Die thermischen Umwelt- und Lebensbedingungen gehören zu den grundlegenden Voraussetzungen für Gesundheit und Wohlbefinden. Der menschliche Organismus ist darauf angewiesen, überschüssige Wärme kontinuierlich an die Umgebung abzugeben und sich während der Nacht ausreichend zu erholen. Veränderungen der Wärmebelastung beeinflussen daher unmittelbar die Möglichkeiten zur Thermoregulation und Erholung.

Abbildung 2 zeigt Facetten der Entwicklung der Wärmebelastung in Baden-Württemberg seit 1950. Dargestellt sind die Änderung der mittleren jährlichen Lufttemperatur, die jährlich aufsummierte Wärmebelastung oberhalb von 25 °C (WB25) und die jährliche Anzahl warmer Nachtstunden mit Lufttemperaturwerten oberhalb von 20 °C. Die rote Linie zeigt die langfristige Entwicklung der jeweiligen Größe, das graue Band den 95-%-Unsicherheitsbereich. Vertikale Linien kennzeichnen Zeitpunkte signifikanter Strukturänderungen in den Zeitreihen.

Seit den späten 1980er bzw. frühen 2000er Jahren verändern sich die thermischen Umweltbedingungen deutlich. Die mittlere Lufttemperatur stieg insbesondere nach dem Strukturbruch von 1987

an (**Abbildung 2a**). Parallel dazu nahm die kumulierte Wärmebelastung oberhalb von 25 °C zu (**Abbildung 2b**), was auf eine stärkere und länger anhaltende thermische Belastung während der warmen Jahreszeit hinweist. Besonders ausgeprägt ist die Entwicklung der warmen Nachtstunden (**Abbildung 2c**), deren Häufigkeit seit dem Jahr 2000 stark zunimmt. Dadurch verschlechtern sich die Möglichkeiten zur nächtlichen Erholung zunehmend.

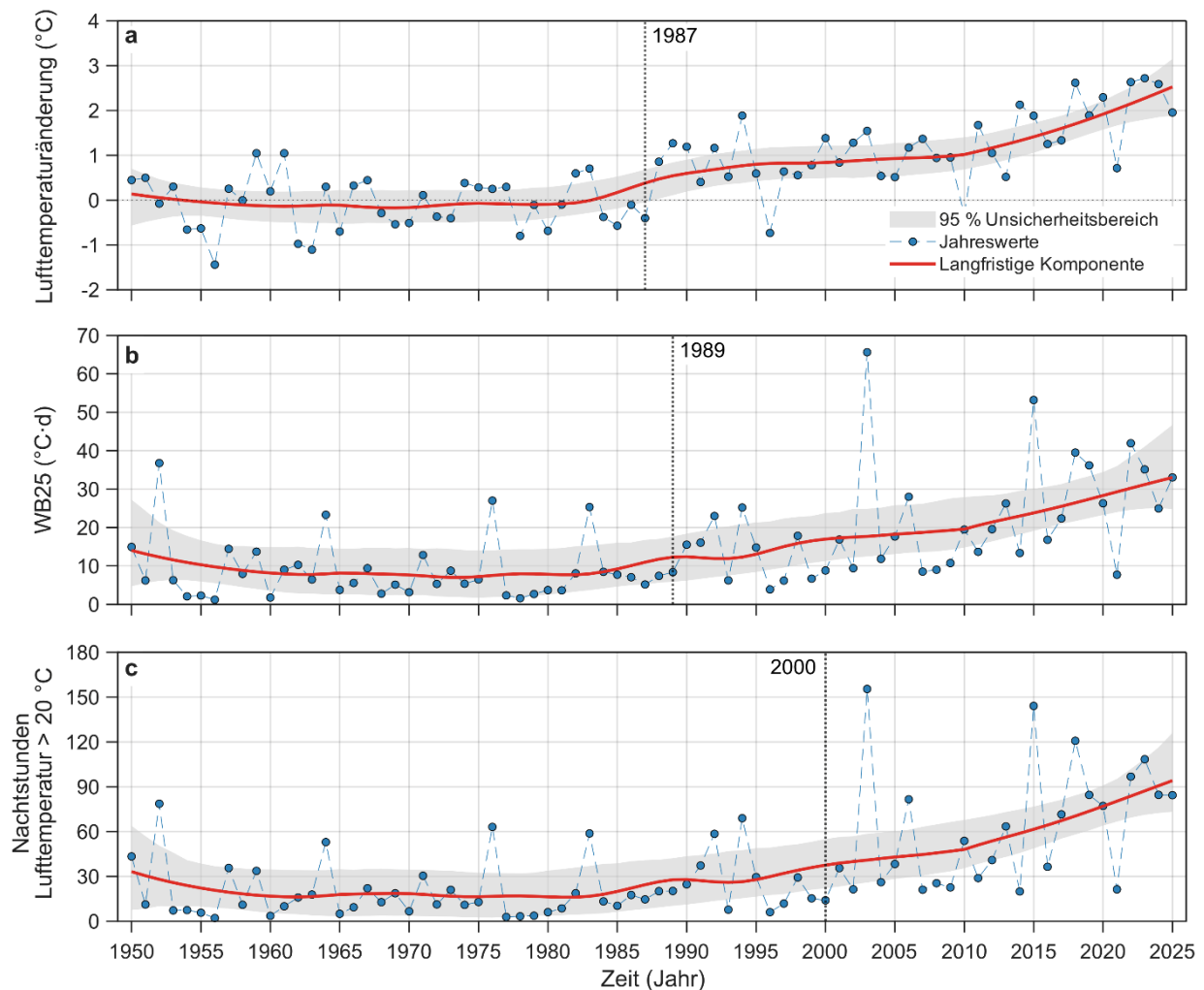


Abbildung 2: Facetten der Wärmebelastung 1950–2025 in Baden-Württemberg. Dargestellt sind (a) die Änderung der mittleren jährlichen Lufttemperatur gegenüber der Referenzperiode 1961–1990, (b) die jährlich kumulierte Wärmebelastung oberhalb von 25 °C (WB25) und (c) die jährliche Anzahl warmer Nachtstunden mit Lufttemperaturwerten oberhalb von 20 °C. Die blauen Punkte zeigen die Jahreswerte, die rote Linie die langfristige Komponente (LOESS-Glättung), die graue Schattierung den 95 %-Unsicherheitsbereich. Vertikale gestrichelte Linien markieren mittels Pettitt-Test (Pettitt, 1979) identifizierte Strukturbrüche bzw. klimatische Zustandsänderungen. Grundlage sind ERA5-Land-Reanalysedaten.

Die drei dargestellten Größen beschreiben unterschiedliche Aspekte derselben Entwicklung. Während die mittlere jährliche Lufttemperatur die klimawandelbedingte Erwärmung in Baden-Württemberg dokumentiert, erfassen WB25 und die warmen Nachtstunden die für den Menschen unmittelbar relevante Belastung durch Hitze. Zusammen zeichnen sie das Bild eines thermischen Lebensraums, der sich in Baden-Württemberg in den vergangenen Jahrzehnten grundlegend verändert hat.

Die Zunahme von Hitzeereignissen und warmen Nächten verändert die thermischen Voraussetzungen für Gesundheit und Erholung und stellt neue Anforderungen an die Anpassungsfähigkeit von Bevölkerung, Infrastruktur und Gesundheitssystem.

Auffällig ist zudem die zeitliche Abfolge der identifizierten Strukturbrüche. Zunächst steigt die mittlere jährliche Lufttemperatur seit dem Jahr 1987 deutlich an. Anschließend nimmt die Wärmebelastung oberhalb von 25 °C ab dem Jahr 1989 zu und schließlich häufen sich warme Nachtstunden ab dem Jahr 2000. Diese Abfolge deutet auf eine fortlaufende Veränderung der thermischen Umweltbedingungen hin, bei der sich die allgemeine Erwärmung zunehmend in gesundheitsrelevanten Belastungsindikatoren niederschlägt.

3 Kopplung von Wärmebelastung und Wasserverfügbarkeit

Mit der steigenden Lufttemperatur verändert sich nicht nur die thermische Belastung, sondern auch die Verfügbarkeit von Wasser. Die steigende Lufttemperatur erhöht den atmosphärischen Wasserbedarf und verstärkt die Verdunstung von Böden und Vegetation. Wärme- und Trockenheitsbelastung treten deshalb häufig gemeinsam auf und beeinflussen sowohl die Lebensbedingungen des Menschen als auch die Funktionsfähigkeit von Ökosystemen. Mit fortschreitender Hitze verändert sich jedoch die Rolle der Verdunstung. Solange ausreichend Wasser im Boden verfügbar ist, wird ein erheblicher Teil der von der Sonne eingestrahnten Energie für die Verdunstung verwendet. Dadurch wird die Landoberfläche gekühlt. Mit zunehmender Austrocknung sinkt jedoch die tatsächliche Verdunstung, weil Boden und Vegetation immer weniger Wasser bereitstellen können. Die frei verfügbare Energie wird dann verstärkt in fühlbare Wärme umgesetzt, wodurch sich Boden und bodennahe Luft zusätzlich erwärmen. Hitze und Wasserknappheit können sich dadurch gegenseitig verstärken und länger andauern.

Zur Beschreibung dieser gekoppelten Entwicklung wird ein Hitze-Trockenheitsindex (HTI) verwendet, der die kumulierte Wärmebelastung (WB25) und die wasserbezogene Belastung durch eine negative klimatische Wasserbilanz (–KWB) zusammenfasst.

Abbildung 3 zeigt die Entwicklung des HTI für Baden-Württemberg von 1951 bis 2024. Positive Werte kennzeichnen Jahre mit hoher Wärmebelastung und geringer Wasserverfügbarkeit, negative Werte vergleichsweise günstige Bedingungen. Die rote Linie zeigt die langfristige Entwicklung, das graue Band den 95%-Unsicherheitsbereich. Der Pettitt-Test identifiziert das Jahr 2002 als Zeitpunkt einer signifikanten Strukturänderung in der Zeitreihe.

Während in den 1950er Jahren bis in die frühen 1980er Jahre überwiegend geringe oder durchschnittliche Belastungen auftraten, steigt der HTI seit den späten 1980er Jahren kontinuierlich an. Nach der Strukturänderung im Jahr 2002 treten Jahre mit gleichzeitig hoher Wärmebelastung und geringer Wasserverfügbarkeit deutlich häufiger auf. Besonders ausgeprägt sind die Belastungen in den Jahren 2003, 2015 sowie 2018 bis 2020 und 2022.

Die Ergebnisse zeigen eine langfristige Verschiebung hin zu einem Klima, in dem hohe Wärmebelastung und geringe Wasserverfügbarkeit zunehmend gemeinsam auftreten. Neuere Studien zeigen, dass beide Prozesse über Rückkopplungen zwischen Bodenfeuchte, Verdunstung und Energieaustausch zusätzlich miteinander verbunden sind. Dadurch kann eine zunehmende Austrocknung die

Verdunstungskühlung der Landschaft vermindern und Hitzeperioden weiter verstärken (Seneviratne et al., 2010; Chen et al., 2026a,b; Yoon et al., 2026). Hitze wirkt dabei als übergreifender Risikoverstärker (UNDRR, 2026; WMO, 2026), der Belastungen des Wasserhaushalts, der Vegetation und der Ökosysteme erhöht.

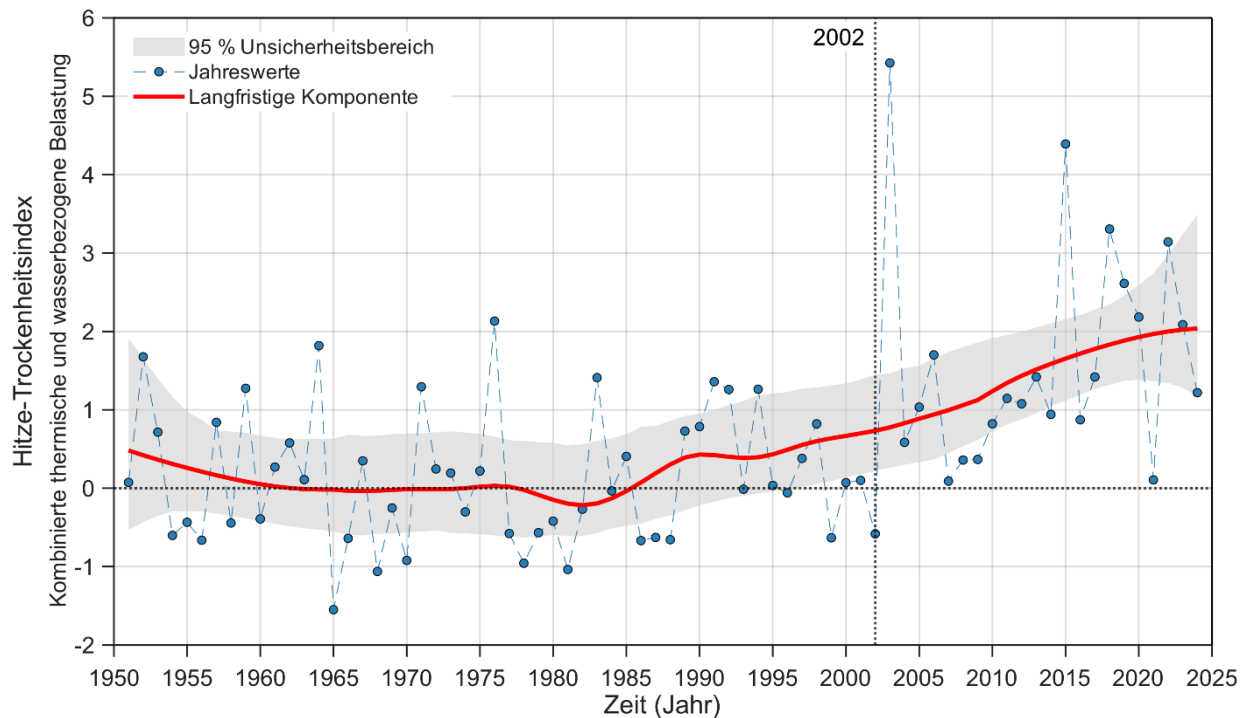


Abbildung 3: Hitze-Trockenheitsindex (HTI) 1951–2024 in Baden-Württemberg. HTI kombiniert die standardisierte kumulierte Wärmebelastung oberhalb von 25 °C (WB25) mit der standardisierten Trockenheitsbelastung quantifiziert durch eine negative klimatische Wasserbilanz (–KWB). Positive Werte kennzeichnen Jahre mit hoher Wärmebelastung und geringer Wasserverfügbarkeit, negative Werte vergleichsweise günstige Bedingungen. Die rote Linie zeigt die langfristige Entwicklung (LOESS-Glättung), das graue Band den 95 %-Unsicherheitsbereich. Der Pettitt-Test (Pettitt, 1979) identifiziert eine signifikante Strukturänderung der Zeitreihe im Jahr 2002. Grundlage sind Gebietsniederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes und ERA5-Land-Reanalysedaten.

4 Veränderung feucht-warmer Bedingungen

Mit der Erwärmung der Atmosphäre nimmt auch ihr Wasserdampfgehalt zu. Zur Beschreibung dieser Entwicklung eignet sich die Taupunkttemperatur. Sie beschreibt den absoluten Wasserdampfgehalt der Luft und gibt an, auf welche Temperatur Luft abgekühlt werden müsste, damit Wasserdampf zu kondensieren beginnt. Je höher die Taupunkttemperatur ist, desto mehr Wasserdampf enthält die Atmosphäre. Sie eignet sich daher besonders zur Charakterisierung feucht-warmer Bedingungen und der damit verbundenen Belastung des menschlichen Wärmehaushalts.

Abbildung 4 zeigt die langfristige Entwicklung der Taupunkttemperatur und daraus abgeleiteter Feuchtegrößen. Die mittlere jährliche Taupunkttemperatur steigt seit den späten 1980er Jahren deutlich an (**Abbildung 4a**). Parallel dazu nehmen sowohl die kumulierte Feuchtebelastung ober-

halb einer Taupunkttemperatur von 18 °C (**Abbildung 4b**) als auch die Anzahl feucht-warmer Nachtstunden zu (**Abbildung 4c**). Besonders ausgeprägt ist diese Entwicklung seit den frühen 2000er Jahren. Warme Bedingungen in Baden-Württemberg gehen damit zunehmend mit höheren Luftfeuchtwerten einher.

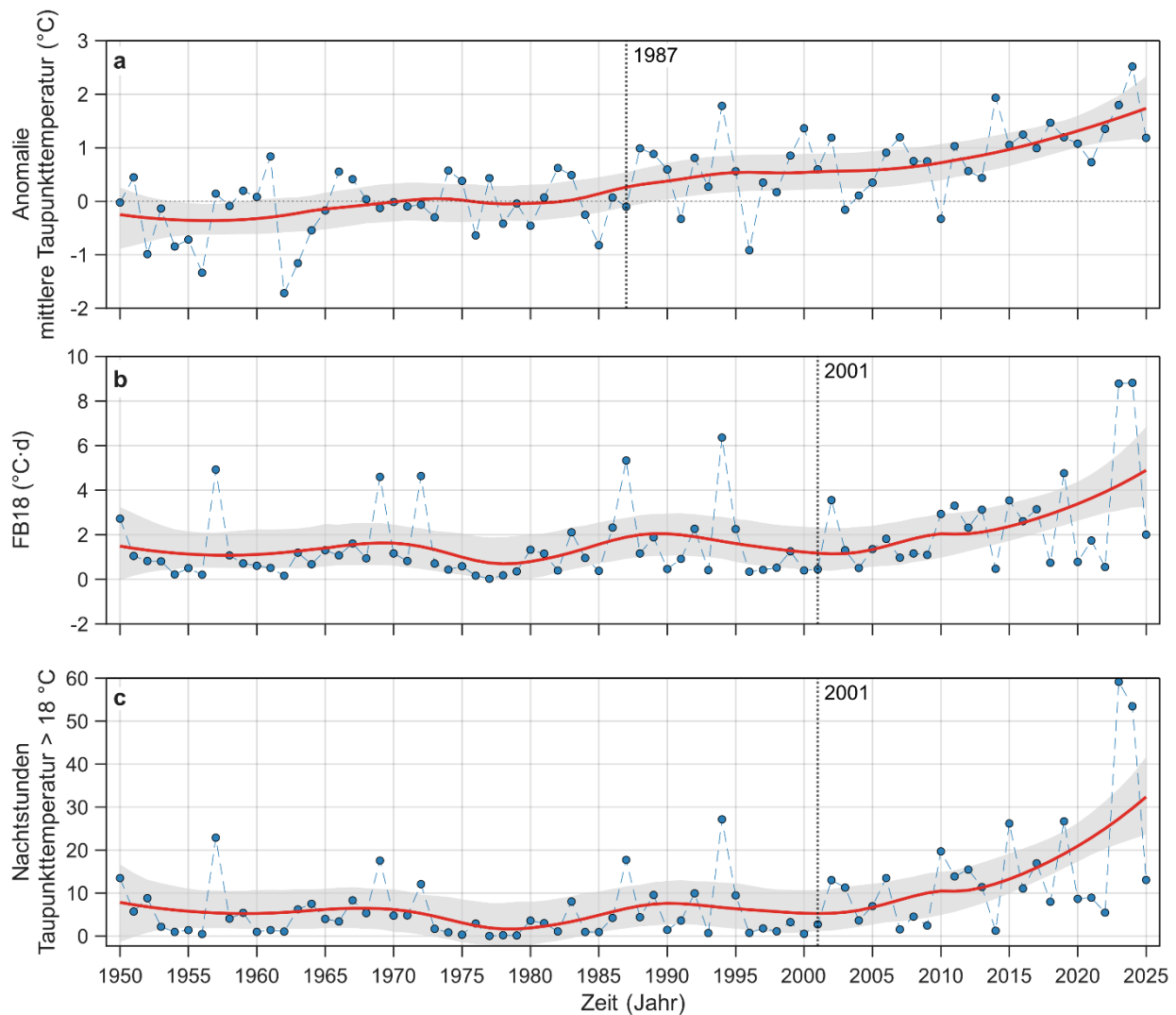


Abbildung 4: Feucht-warmer Bedingungen 1950–2025 in Baden-Württemberg. Dargestellt sind (a) die Anomalie der mittleren jährlichen Taupunkttemperatur, (b) die jährlich kumulierte Feuchtebelastung oberhalb einer Taupunkttemperatur von 18 °C (FB18) und (c) die jährliche Anzahl feucht-warmer Nachtstunden mit Taupunkttemperaturwerten oberhalb von 18 °C. Die rote Linie zeigt die langfristige Entwicklung (LOESS-Glättung), das graue Band den 95%-Unsicherheitsbereich. Grundlage sind ERA5-Land-Reanalysedaten.

Wie bei den Temperaturgrößen zeigt sich auch bei den Feuchtegrößen eine zeitliche Abfolge der Veränderungen. Zunächst steigt der mittlere Wasserdampfgehalt der Atmosphäre an, bevor seit den frühen 2000er Jahren Häufigkeit und Intensität feucht-warmer Bedingungen deutlich zunehmen.

Hohe Taupunkttemperaturwerte sind gesundheitlich relevant, weil durch sie zum Ausdruck kommt, dass die Verdunstung von Schweiß als eine wichtige Form der Wärmeabgabe des menschlichen Kör-

pers unter ungünstigen Bedingungen stattfinden muss. Besonders kritisch sind Situationen, in denen hohe Luft- und Taupunkttemperaturwerte gleichzeitig auftreten. Dann kann der Körper überschüssige Wärme nur eingeschränkt abgeben, wodurch die thermische Belastung zunimmt und die nächtliche Erholung erschwert wird.

Die zunehmende Zahl feucht-warmer Nachtstunden weist darauf hin, dass sich die Möglichkeiten zur nächtlichen Abkühlung und Regeneration in Baden-Württemberg verschlechtern.

Im Gegensatz zur Hitze-Trockenheitskopplung zeigen die Feuchtegrößen nur schwache Zusammenhänge mit der klimatischen Wasserbilanz. Feucht-warme Bedingungen und Trockenheit beschreiben daher unterschiedliche Dimensionen des Klimawandels. Während Trockenheit vor allem die Wasserverfügbarkeit von Böden, Vegetation und Gewässern beeinflusst, wirkt sich eine zunehmende atmosphärische Feuchte unmittelbar auf die Thermoregulation des Menschen aus. Feucht-warme Bedingungen stellen damit einen eigenständigen gesundheitsrelevanten klimatischen Belastungspfad dar.

5 Veränderung biologischer Umweltbedingungen

Die bisher dargestellten Veränderungen betreffen vor allem die physikalischen Rahmenbedingungen des Lebensraums. Die klimawandelbedingt steigende Lufttemperatur, zunehmende Wärmebelastung, veränderte Wasserverfügbarkeit und häufiger auftretende feucht-warme Bedingungen beeinflussen jedoch auch Pflanzen und Ökosysteme. Da Pflanzen besonders sensibel auf Temperatur- und Wasserverhältnisse reagieren, gehören Veränderungen von Blüh- und Austriebszeitpunkten sowie der Länge der Vegetationsperiode zu den empfindlichsten biologischen Indikatoren des Klimawandels (Walther et al., 2002). Gleichzeitig prägt Vegetation durch Verschattung, Verdunstungskühlung, Luftreinhaltung und Erholungsräume selbst wichtige gesundheitsrelevante Umweltbedingungen.

Abbildung 5 zeigt deutliche Veränderungen phänologischer Kenngrößen in Baden-Württemberg seit den 1950er Jahren. Sowohl der Blühbeginn der Hasel als auch der Blattaustrieb der Rosskastanie haben sich im langfristigen Mittel auf frühere Zeitpunkte im Jahr verlagert (**Abbildung 5a,b**). Gleichzeitig verlängert sich die Vegetationsperiode sowohl nach der Definition über Salweide und Stieleiche (**Abbildung 5c**) als auch bei der Rotbuche (**Abbildung 5d**). Die Veränderungen treten somit bei unterschiedlichen Pflanzenarten und phänologischen Kenngrößen konsistent auf.

Die zeitliche Übereinstimmung der Strukturänderungen mit dem Beginn der beschleunigten Erwärmung Ende der 1980er Jahre spricht dafür, dass die beobachteten phänologischen Veränderungen eine biologische Reaktion auf den Klimawandel darstellen. Dass verschiedene Baumarten gleichzeitig klimawandelbeeinflusste Entwicklungen zeigen, weist auf großräumige und systemische Veränderungen biologischer Umweltbedingungen in Baden-Württemberg hin.

Die beobachteten Veränderungen sind dabei nicht grundsätzlich positiv oder negativ zu bewerten. Während eine längere Vegetationsperiode physiologische Prozesse wie die Transpiration verlängern kann, erhöhen frühere Blüh- und Austriebszeitpunkte das Risiko von Spätfrostschäden und können zeitliche Wechselwirkungen zwischen Pflanzen, Bestäubern und anderen Organismen verändern.

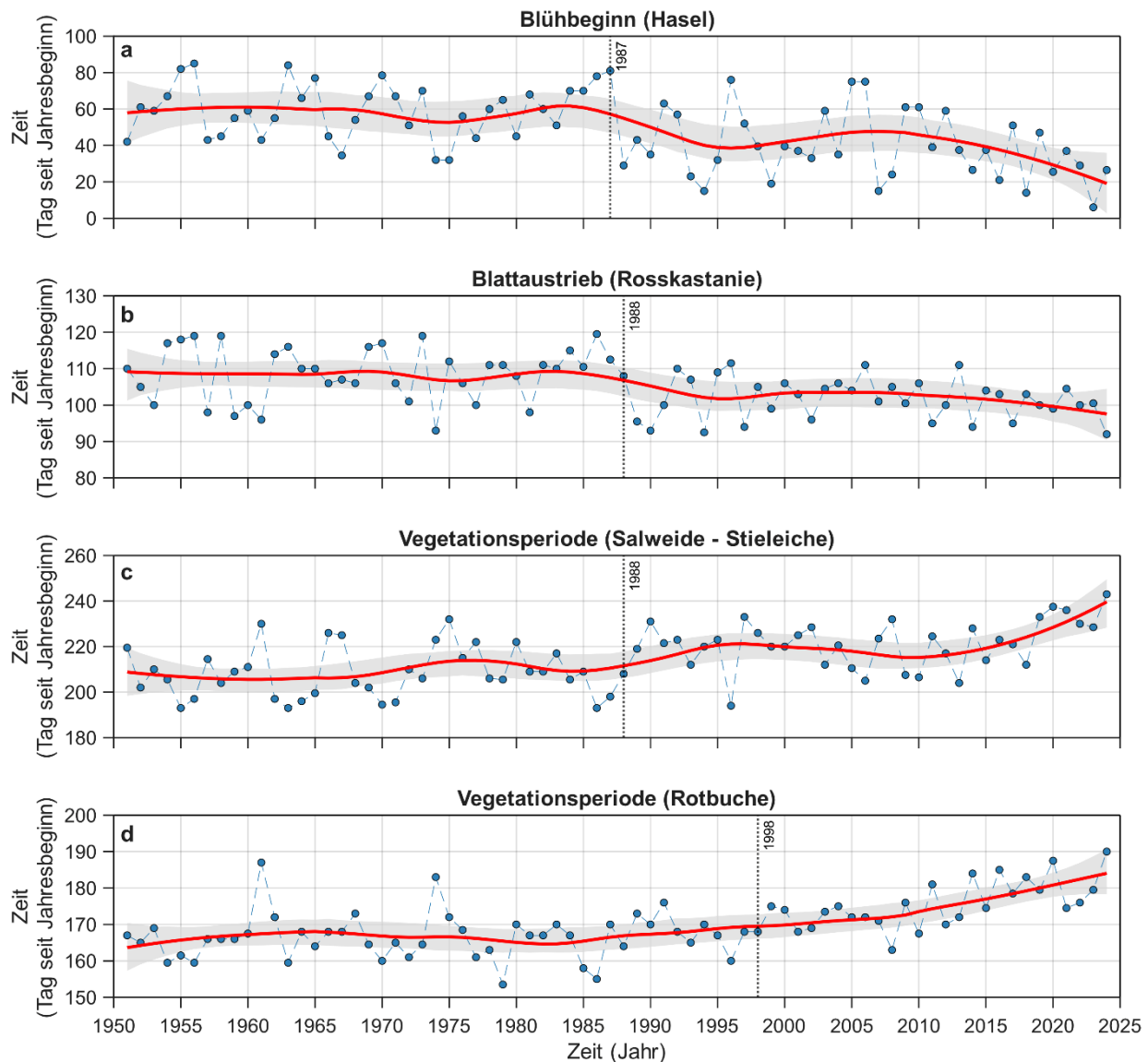


Abbildung 5: Phänologische Größen 1951–2024 in Baden-Württemberg. Dargestellt sind (a) der Blühbeginn der Hasel, (b) der Blattaustrieb der Rosskastanie, (c) die Länge der kombinierten Vegetationsperiode von Salweide und Stieleiche sowie (d) die Länge der Vegetationsperiode der Rotbuche. Die rote Linie zeigt die langfristige Entwicklung (LOESS-Glättung), das graue Band den 95%-Unsicherheitsbereich. Grundlage sind phänologische Beobachtungsdaten des Deutschen Wetterdienstes.

6 Veränderung der winterlichen Frostbedingungen

Die phänologischen Veränderungen zeigen, dass Pflanzen in Baden-Württemberg bereits messbar auf den Klimawandel reagieren. Dieser beschränkt sich nicht auf die warme Jahreszeit, sondern verändert auch die winterlichen Umweltbedingungen. Mit steigender Lufttemperatur verschiebt sich die Grenze zwischen überwiegend frost- und tauwettergeprägten Bereichen zunehmend in höhere Lagen.

Zur Quantifizierung dieser Entwicklung wurde die winterliche (Dezember, Januar, Februar) Nullgradisotherme für Baden-Württemberg berechnet (**Abbildung 6**). Sie beschreibt jene Höhenlage, in der

die mittlere Lufttemperatur in den Monaten Dezember bis Februar 0°C beträgt. Sie kann als klimatische Grenze zwischen überwiegend frost- und tauwettergeprägten Winterbedingungen interpretiert werden.

Die winterliche Nullgradisotherme stieg seit den 1950er Jahren von etwa 510 m auf rund 1010 m über dem Meeresspiegel an (**Abbildung 6a**). Dadurch verlagerte sich die klimatische Frostgrenze um etwa 500 m nach oben (**Abbildung 6b**), wodurch der Anteil der Landesfläche mit überwiegend frostgeprägten Winterbedingungen von rund 45 % auf etwa 1 % schrumpfte (**Abbildung 6c**). Frostgeprägte Winter treten damit im langjährigen Mittel nur noch in den höchsten Lagen des Schwarzwaldes auf.

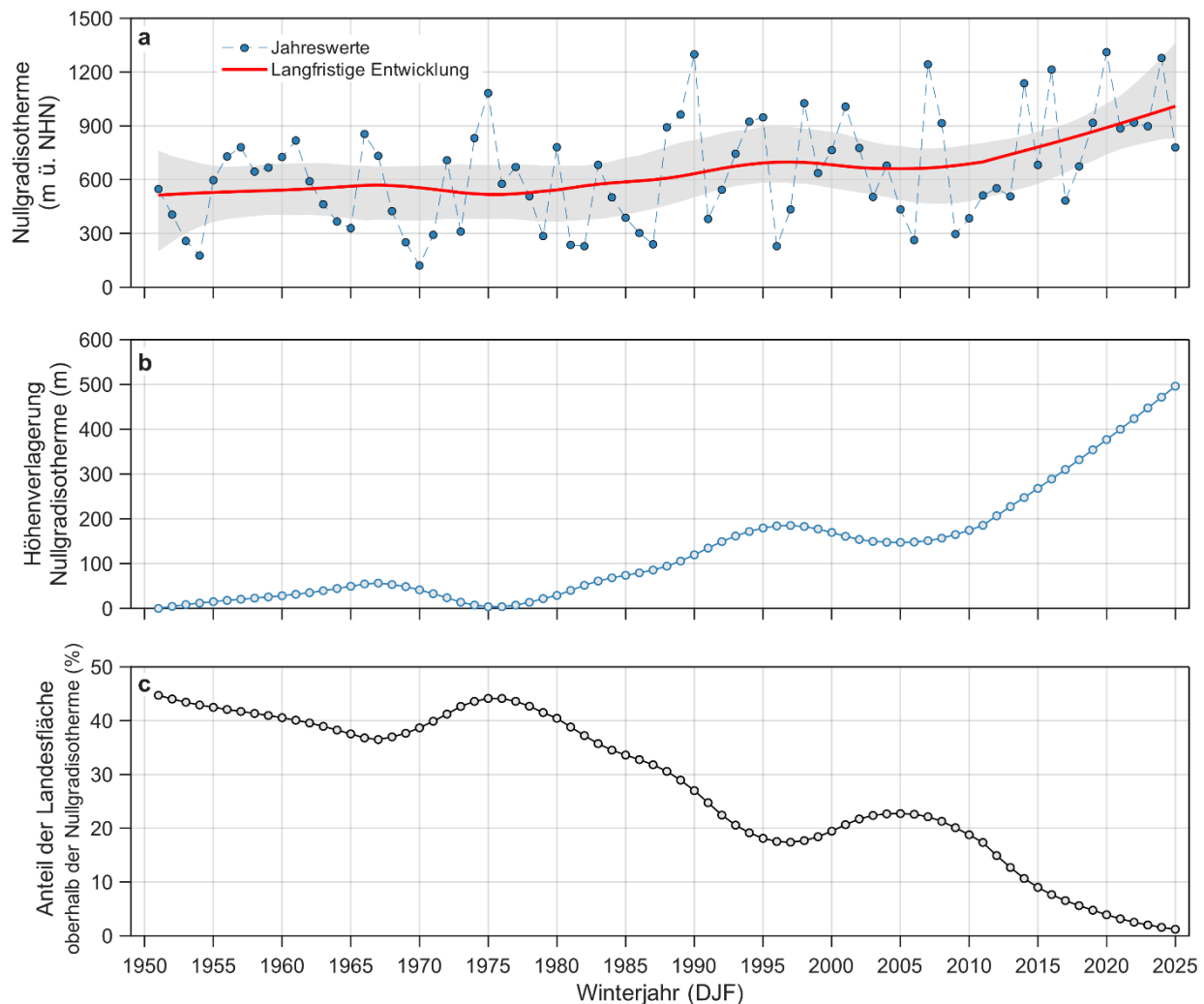


Abbildung 6: Winterliche Frost- und Tauwetterbereiche 1951–2025 in Baden-Württemberg. Dargestellt sind (a) die Höhe der winterlichen (Dezember, Januar, Februar) Nullgradisotherme über dem Meeresspiegel, (b) die Höhenverlagerung der Nullgradisotherme gegenüber 1951 und (c) der Anteil der Landesfläche mit überwiegend frostgeprägten Winterbedingungen. Die rote Linie zeigt die langfristige Entwicklung (LO-ESS-Glättung), das graue Band den 95%-Unsicherheitsbereich. Grundlage sind Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der Klimawandel den Jahresgang des klimatischen Lebensraums insgesamt verändert. Nicht nur die sommerliche Hitze nimmt zu, sondern auch die frostgeprägten

Winterbedingungen treten seltener auf und werden kleinräumiger. Direkt davon betroffen sind unter anderem die Ausdehnung der Schneebedeckung und des Bodenfrostes, der Wasserhaushalt und die Lebensbedingungen von Tier- und Pflanzenarten.

7 Veränderung gesundheitsfördernder Umwelt- und Lebensbedingungen

7.1 Ein systemischer Wandel des klimatischen Lebensraums

Die vorangegangenen Analysen zeigen, dass sich gesundheitsrelevante Umwelt- und Lebensbedingungen in Baden-Württemberg bereits systemisch verändert haben. Dabei handelt es sich nicht um einzelne Wetterereignisse oder kurzfristige Schwankungen, sondern um einen tiefgreifenden und langfristigen Wandel des klimatischen Lebensraums. Thermische, hydrologische und biologische Veränderungen treten gleichzeitig auf und verändern gemeinsam die Voraussetzungen für Gesundheit, Wohlbefinden und Lebensqualität.

Besonders bemerkenswert ist die konsistente Manifestation der klimawandelbedingten Veränderungen in den voneinander unabhängigen Datengrundlagen. Diese Konsistenz spricht dafür, dass die beobachteten Veränderungen Ausdruck eines ubiquitären Wandels sind und nicht isolierte Entwicklungen einzelner Umweltkomponenten darstellen.

7.2 Eine Kaskade klimatischer Veränderungen

Die in den untersuchten Zeitreihen identifizierten Strukturänderungen folgen einer zeitlichen Abfolge. Den Beginn markiert der Anstieg der mittleren jährlichen Lufttemperatur Ende der 1980er Jahre. Zeitgleich reagieren Pflanzen mit früheren Blüh- und Austriebszeitpunkten sowie einer Verlängerung der Vegetationsperiode. Seit den frühen 2000er Jahren treten zusätzlich feucht-warme Bedingungen sowie kombinierte Hitze-Trockenheitsbelastungen deutlich stärker ausgeprägt auf. Diese zeitliche Abfolge deutet darauf hin, dass sich die Auswirkungen des Klimawandels fortlaufend über verschiedene Komponenten des Lebensraums ausbreiten.

7.3 Das Zusammenwirken klimatischer Belastungen

Die gesundheitliche Relevanz ergibt sich nicht aus den einzelnen Veränderungen, sondern aus ihrem gemeinsamen Auftreten und ihrer gegenseitigen Verstärkung. Hitze wirkt dabei als verbindendes Element verschiedener Belastungspfade. Sie erhöht den atmosphärischen Wasserbedarf, verstärkt Trockenheitsbelastungen und erschwert bei hoher Luftfeuchte die Thermoregulation des Menschen. Die gesundheitlichen Auswirkungen des Klimawandels entstehen damit aus dem Zusammenwirken thermischer, hydrologischer und biologischer Veränderungen.

Wie stark Menschen von den klimatischen Veränderungen betroffen sind, hängt wesentlich von ihren Lebensbedingungen ab. Alter, Vorerkrankungen, Wohnsituation, berufliche Exposition sowie der Zugang zu kühlen Aufenthaltsräumen beeinflussen maßgeblich, wie klimatische Belastungen gesundheitlich wirksam werden.

8 Konsequenzen für Gesundheitsschutz, Klimaanpassung und Klimaschutz

8.1 Gesundheitsschutz und Anpassung gemeinsam denken

Aus den dargestellten Veränderungen ergeben sich weitreichende Konsequenzen für Prävention, Gesundheitsvorsorge und Klimaanpassung. Viele der hierfür relevanten Maßnahmen werden bereits durch das Land Baden-Württemberg, Kommunen und Fachbehörden verfolgt. Die vorliegenden Ergebnisse sprechen dafür, diese Aktivitäten massiv auszubauen und stärker miteinander zu verknüpfen.

Thermischer Lebensraum

Die zunehmende Wärmebelastung erfordert insbesondere Maßnahmen zum Hitzeschutz. Hierzu zählen die konsequente, flächige Umsetzung kommunaler Hitzeaktionspläne, die Schaffung und Sicherung von Stadtgrün, Verschattungsmaßnahmen, die Bereitstellung kühlender Aufenthaltsräume sowie die Anpassung von Kliniken, Pflegeeinrichtungen, Schulen und Kindertageseinrichtungen an häufigere und langanhaltendere Hitzeperioden.

Mit zunehmender Wärmebelastung gewinnen auch die Aufenthaltsqualität und Nutzbarkeit öffentlicher Räume an Bedeutung. Während Hitzeperioden können unverschattete Plätze, Wege und Freiflächen an Attraktivität verlieren und dadurch das Mobilitäts- und Aufenthaltsverhalten beeinflussen. Begrünung, Verschattung und kühlende Freiräume tragen deshalb nicht nur zum Gesundheitsschutz bei, sondern erhalten zugleich die Nutzbarkeit öffentlicher Räume und unterstützen klimangepasste Mobilität – öffentlicher Verkehr, Fuß- und Radverkehr benötigen hitzeangepasste Infrastrukturen und Ermöglichungsräume. Auch Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Rettungswesen müssen sich auf häufigere, intensivere und länger anhaltende Hitzebelastungen einstellen.

Wasserbezogener Lebensraum

Die zunehmende Kopplung von Hitze und Trockenheit unterstreicht die Bedeutung eines proaktiven, tiefgreifenden, dauerhaften Wassermanagements (Schmidt et al., 2026). Wasserrückhalt in der Landschaft, Grundwasserschutz, Gewässerrenaturierung und Schwammstadtkonzepte tragen nicht nur zur Sicherung der Wasserverfügbarkeit bei, sondern erhalten gleichzeitig die Verdunstungskühlung von Landschaften und Siedlungen. Dadurch können sie die gegenseitige Verstärkung von Hitze und Trockenheit abschwächen.

Biologischer Lebensraum

Der Erhalt klimaregulierender Vegetation gewinnt sowohl in Städten als auch in ländlichen Räumen an Bedeutung. Stadtbäume, Grünflächen, naturnahe Gewässerräume und klimaresiliente Wälder fördern Biodiversität, Luftqualität, thermische Entlastung und Erholung gleichermaßen.

Monitoring

Langfristige, systematische Klima-, Wasserhaushalts- und Phänologiebeobachtungen bilden die Grundlage, Veränderungen frühzeitig zu erkennen, Anpassungsmaßnahmen zu bewerten und ihre Wirksamkeit langfristig zu überprüfen (Schmidt et al., 2025).

8.2 Gesundheitsschutz und Klimaschutz gemeinsam denken

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Gesundheitsschutz, Klimaanpassung und Klimaschutz künftig stärker gemeinsam gedacht werden müssen. Das gilt auch für das Gesundheitswesen selbst, das mit rund 4,4 % der globalen Treibhausgasemissionen zum Klimawandel beiträgt (Braithwaite et al., 2024). Maßnahmen wie klimaresiliente Gesundheitseinrichtungen, nachhaltige Beschaffung, emissionsarme Lieferketten und energieeffiziente Infrastrukturen stärken nicht nur die Anpassungsfähigkeit des Gesundheitswesens, sondern tragen zugleich zur Minderung von Treibhausgasemissionen bei.

Gleichzeitig zeigen die Analysen die Grenzen der Anpassung auf. Anpassungsmaßnahmen können die Folgen bereits eingetretener Veränderungen abmildern, den fortschreitenden Wandel des klimatischen Lebensraums jedoch nicht aufhalten. Der langfristige Erhalt gesundheitsförderlicher Umwelt- und Lebensbedingungen setzt deshalb voraus, die Ursachen des Klimawandels wirksam zu begrenzen. Konsequenter Klimaschutz ist damit zugleich langfristiger Gesundheitsschutz.

8.3 Anschlussfähigkeit an die Landesentwicklung

Die dargestellten Entwicklungen der gesundheitsrelevanten Umwelt- und Lebensbedingungen stehen in engem Zusammenhang mit den laufenden Aktivitäten des Landes Baden-Württemberg zur Klimaanpassung und Gesundheitsvorsorge. Mit der Fortschreibung der Anpassungsstrategie Baden-Württemberg (UM BW, 2023), dem Kompetenzzentrum Klimawandel und Gesundheit (MSAG BW, 2026a), dem Aktionsbündnis Klimawandel und Gesundheit (MSAG BW, 2026b) und der Fortschreibung des Landesentwicklungsplans (MLW BW, 2023) wurden wichtige Grundlagen geschaffen.

Die präsentierten Entwicklungen sprechen jedoch dafür, gesundheitsrelevante Umwelt- und Lebensbedingungen künftig noch stärker als verbindendes Element zwischen Klimaanpassung, Landesentwicklung, Gesundheitsvorsorge und kommunaler Planung zu verstehen. Thermische Belastung, Wasserverfügbarkeit, atmosphärische Feuchte, Vegetationsentwicklung und winterliche Frostbedingungen verändern sich nicht unabhängig voneinander, sondern als Bestandteile eines gemeinsamen klimatischen Systems. Eine erfolgreiche Anpassung wird daher zunehmend davon abhängen, diese Zusammenhänge systemisch in Planung und Vorsorge zu berücksichtigen.

9 Datenquellen

Die verwendeten Datensätze decken meteorologische, hydrologische und biologische Komponenten des klimatischen Lebensraums ab. Durch die Kombination unabhängiger Mess-, Reanalyse- und Beobachtungsdaten lassen sich klimawandelbedingte Veränderungen gesundheitsrelevanter Umwelt- und Lebensbedingungen aus unterschiedlichen Perspektiven erfassen. Die Verwendung mehrerer unabhängiger Datengrundlagen ermöglicht zudem eine gegenseitige Plausibilisierung der beobachteten Entwicklungen.

9.1 Stationsdaten der Lufttemperatur

Zur Berechnung der winterlichen (Dezember, Januar, Februar) Nullgradisotherme und ihrer Verlagerung wurden Monatsmittelwerte der Lufttemperatur, die an Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) von 1950 bis 2026 gemessen wurden, verwendet.

DWD-CDC (Climate Data Center des Deutschen Wetterdienstes), 2026. Monatsmittel der Stationsmessungen der Lufttemperatur in 2 m Höhe. Abrufbar unter: <https://cdc.dwd.de/portal/202209231028/searchview/> (Zugriff am 12.06.2026)

9.2 Reanalysedaten der Luft- und Taupunkttemperatur

Gebietsmittelwerte der Luft- und Taupunkttemperatur wurden auf Grundlage stündlicher ERA5-Land-Reanalysedaten berechnet. Die Daten weisen eine räumliche Auflösung von etwa 9 km auf und ermöglichen die Quantifizierung langfristiger Temperatur- und Feuchteentwicklungen für Baden-Württemberg.

CDS (Climate Data Store, copernicus), 2026. ERA5 Land hourly time-series data from 1950 to present – 2m temperature and 2m dewpoint temperature. Abrufbar unter <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-land-timeseries?tab=download> (Zugriff am 12.06.2026)

9.3 Phänologische Beobachtungsdaten

Zur Analyse klimabedingter Veränderungen der Vegetationsentwicklung wurden phänologische Beobachtungen an den Baumarten Hasel (*Corylus avellana*), Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum*), Rotbuche (*Fagus sylvatica*), Stieleiche (*Quercus robur*) und Salweide (*Salix caprea*) des Deutschen Wetterdienstes verwendet.

DWD-CDC (Climate Data Center des Deutschen Wetterdienstes), 2026. Phenology – Annual reporters. Abrufbar unter https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/phenology/annual_reporters/wild/historical/ und https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/phenology/annual_reporters/wild/recent/ (Zugriff am 12.06.2026)

9.4 Daten des Gebietsniederschlags und der Verdunstung

Der Gebietsniederschlag basiert auf flächengewichtet gemittelten Monatswerten, die über das Climate Data Center (CDC) des Deutschen Wetterdienstes zur Verfügung gestellt 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/

Die Verdunstung wird als modellierte tatsächliche Verdunstung aus dem ERA5-Land-Reanalysedatensatz 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>

Aus Gebietsniederschlag und tatsächlicher Verdunstung wurde die klimatische Wasserbilanz (KWB) als Differenz aus Niederschlag und Verdunstung berechnet. Sie dient in diesem Impulspapier als Maß für die klimatisch bedingte Wasserverfügbarkeit (Schmidt et al., 2026).

10 Methodik

Das Impulspapier ist ein Beitrag zur evidenzbasierten Beobachtung gesundheitsrelevanter Umwelt- und Lebensbedingungen in Baden-Württemberg. Es folgt dem Konzept der „Living Evidence“, bei dem aktuelle Beobachtungsdaten und wissenschaftliche Erkenntnisse fortlaufend zusammengeführt werden, um politische Entscheidungen auf einer möglichst aktuellen Wissensbasis zu unterstützen (DESTINY, 2026).

Die analysierten Größen beschreiben langfristige Veränderungen jener Umwelt- und Lebensbedingungen, über die sich klimatische Einflüsse auf Gesundheit und Wohlbefinden entfalten können. Die kontinuierliche Beobachtung solcher Größen gilt als wichtige Voraussetzung für evidenzbasierte Anpassungsstrategien und die Bewertung klimawandelbedingter Belastungen (Schmidt et al., 2025).

10.1 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 der Daten voraussetzt (Sen, 1968; Theil, 1992).

10.2 Mann-Kendall-Test

Mit dem nichtparametrischen Mann-Kendall-Test wurde geprüft, ob eine Zeitreihe eine systematische Zu- oder Abnahme aufweist. Das Verfahren basiert auf Rangstatistiken und erfordert keine Annahmen über die Verteilung der zugrundeliegenden Daten (Mann, 1945; Kendall, 1948).

10.3 Pettitt-Test

Mögliche Strukturänderungen oder Regimewechsel im Verlauf von Zeitreihen 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.

10.4 Berechnung der Wärme- und Feuchtebelastung

Die kumulierte Wärmebelastung oberhalb von 25 °C (WB25) wurde auf der Grundlage stündlicher Lufttemperaturwerte berechnet. Für jede Rasterzelle in Baden-Württemberg wurden alle Überschreitungen des Lufttemperaturwertes von 25 °C aufsummiert. Anschließend wurde über alle Rasterzellen Baden-Württembergs gemittelt und zur Darstellung wurden Gradtage (°C·d) berechnet:

$$WB25 = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^N \max(T_i - 25 \text{ °C}, 0) \quad (1)$$

Dabei bezeichnet T_i die stündliche Lufttemperatur und N die Anzahl der Stunden eines Jahres.

Analog zu WB25 wurde zur Quantifizierung der kumulierten Feuchtebelastung die Kenngröße FB18 definiert. Sie beschreibt die über ein Jahr aufsummierten stündlichen Überschreitungen des Taupunkttemperaturwertes von 18 °C. Für FB18 wurden ebenfalls Gradtage (°C·d) berechnet:

$$FB18 = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^N \max(T_{d,i} - 18 \text{ °C}, 0) \quad (2)$$

Dabei bezeichnet $T_{d,i}$ stündliche Taupunkttemperaturwerte.

Der kombinierte Hitze-Trockenheitsindex (HTI) wurde aus WB25 und der standardisierten Trockenheitsbelastung infolge einer negativen klimatischen Wasserbilanz (–KWB) berechnet:

$$HTI = \frac{Z_{WB25} + Z_{-KWB}}{2} \quad (3)$$

Mit

$$Z_{WB25} = \frac{WB25 + \mu_{WB25}}{\sigma_{WB25}} \quad (4)$$

Und

$$Z_{-KWB} = \frac{-KWB + \mu_{-KWB}}{\sigma_{-KWB}} \quad (5)$$

Mittelwert (μ) und Standardabweichung (σ) wurden für WB25 und –KWB auf Grundlage der Referenzperiode 1961–1990 berechnet. Positive HTI-Werte kennzeichnen Jahre mit gleichzeitig hoher Wärmebelastung und geringer Wasserverfügbarkeit, negative Werte vergleichsweise günstige Bedingungen.

10.5 LOESS-Glättung

Zur Darstellung langfristiger Entwicklungen wurde eine lokal gewichtete Regressionsglättung (LOESS) verwendet. Die Glättung erfolgte mit einem Zeitfenster von 30 Jahren. Zur Abschätzung der Unsicherheit der geglätteten Kurven wurden Bootstrap-Resampling-Verfahren mit 1000 Wiederholungen durchgeführt. Die grauen Bänder in den Abbildungen kennzeichnen die daraus abgeleiteten 95%-Unsicherheitsbereiche.

10.6 Berechnung der winterlichen Nullgradisotherme

Zur Bestimmung der winterlichen Nullgradisotherme wurden Lufttemperaturdaten von Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Baden-Württemberg für den Zeitraum 1951 bis 2025 verwendet. Für jede Station wurde zunächst die mittlere Lufttemperatur der Wintermonate Dezember bis Februar (DJF) berechnet.

Für alle Winter wurde anschließend der Zusammenhang zwischen Stationshöhe und mittlerer DJF-Lufttemperatur mittels linearer Regression bestimmt. Aus der Regressionsfunktion wurde jene Höhenlage abgeleitet, bei der die mittlere Winterlufttemperatur 0 °C beträgt. Diese Höhenlage wurde als winterliche Nullgradisotherme des jeweiligen Jahres definiert.

Von der Analyse ausgeschlossen wurden Jahre, für die weniger als zehn Stationen mit gültigen Werten zur Verfügung standen, bei denen die Lufttemperatur mit zunehmender Höhe nicht abnahm oder bei denen die berechnete Nullgradisotherme außerhalb des Höhenbereichs Baden-Württembergs lag. Fehlende Jahreswerte wurden interpoliert (Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial). Zur Darstellung langfristiger Veränderungen wurde die Zeitreihe der jährlichen Nullgradisothermenwerte mit einer 30-jährigen LOESS-Kurve geglättet.

Für die Flächenanalyse wurde die geglättete Nullgradisotherme mit einem digitalen Höhenmodell Baden-Württembergs verschnitten. Für jedes Jahr wurde der Anteil der Landesfläche bestimmt, dessen Geländehöhe oberhalb des jeweiligen Nullgradisothermenwertes lag. Zusätzlich wurde die Veränderung der Höhe der Nullgradisotherme relativ zum ersten gültigen Analysejahr berechnet.

11 Quellenverzeichnis

arznei-telegramm, 2026. HITZE: Ein unterschätztes Problem im Alltag und bei Sportveranstaltungen. *arznei-telegramm* 57, 41–42. Abrufbar unter: <https://www.arznei-telegramm.com/de/6498/hitze-ein-unterschaetztes-problem-im-alltag-und-bei-sportveranstaltungen>

Atwoli et al., 2021. Call for emergency action to limit global temperature increases, restore biodiversity, and protect health. *British Medical Journal* 374, n1734. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1136/bmj.n1734>

Braithwaite et al., 2024. Strategies and tactics to reduce the impact of healthcare on climate change: systematic review. *British Medical Journal* 387, e081284. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1136/bmj-2024-081284>

Campbell-Lendrum D, Neville T, Schweizer C, Neira M, 2023. Climate change and health: three grand challenges. *Nature Medicine* 29, 1631–1638. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02438-w>

Chen H, Good SP, Zahn E, Bou-Zeid E, Caylor KK, Fiorella RP, Haagsman M, Wang L, 2026a. Shifts in evapotranspiration components during heatwaves alter surface cooling. *Earth's Future* 14, e2025EF006562. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1029/2025EF006562>

Chen S, Ji P, Yuan S, Xu Q, Lu C, Zhang J, 2026b. Contrary effects of soil moisture-atmosphere feedback on dry and humid heatwaves. *Nature Communications* 17, 2626. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-70210-y>

DESTINY, 2026. DESTINY – AI-Powered Living Evidence for Climate & Health. Abrufbar unter: <https://destiny-evidence.github.io/website/> (Zugriff am 20.06.2026)

FAO (Food and Agricultural Organization) und WMO (World Meteorological Organization), 2026. Extreme heat and agriculture. FAO-WMO joint report. Abrufbar unter: https://library.wmo.int/viewer/69845/download?file=FAO-WMO-Extreme-Heat-Report-2026_en.pdf&type=pdf&navigator=1 (Zugriff am 20.06.2026)

Hassan T, Gulzar R, Ahmad M, Waza SA, Khuroo AA, 2023. Plant phenology shifts under climate warming: a systematic review of recent scientific literature. *Environmental Monitoring and Assessment* 196, 36. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-12190-w>

Hurrelmann K, Richter M, 2022. Determinanten der Gesundheit. Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung (BZgA) (Hrsg.) Leitbegriffe der Gesundheitsförderung und Prävention. Glossar zu Konzepten, Strategien und Methoden. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.17623/BZGA:Q4-i008-2.0>

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

Kriit et al., 2026. The 2026 Europe report of the Lancet Countdown on health and climate change: narrowing window for decisive health action. *The Lancet Public Health* 11, e386e407. Abrufbar unter: [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(26\)00025-3](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(26)00025-3)

Lang W, Zhang Y, Li X, Meng F, Liu Q, Wang K, Xu H, Penuelas J, Janssens IA, Piao, S, 2025. Phenological divergence between plants and animals under climate change. *Nature Ecology & Evolution* 9, 261–272. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02597-0>

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://mlw.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mlw/intern/Dateien/02_Landesentwicklung/Landesentwicklungsplan/Eckpunkte_barrierefrei.pdf (Zugriff am 20.06.2026)

MSAG BW (Ministerium für Soziales, Arbeit und Gesundheit), 2026a. Kompetenzzentrum Klimawandel und Gesundheit. Abrufbar unter: <https://www.gesundheitsamt-bw.de/ueber-uns/kompetenzzentren/kompetenzzentrum-klimawandel-und-gesundheit/> (Zugriff am 20.06.2026)

MSAG BW (Ministerium für Soziales, Arbeit und Gesundheit), 2026b. Aktionsbündnis Klimawandel und Gesundheit. Abrufbar unter: <https://www.gesundheitsamt-bw.de/ueber-uns/kompetenzzentren/kompetenzzentrum-klimawandel-und-gesundheit/> (Zugriff am 20.06.2026)

Patzina-Mehling C, Kopp A, Lee YS, Birkel MX, Ebers S, Voigt, K, Graff SL, Beisel U, Landgraf C, Ganz F, Planillo A, Kramer-Schadt S, Junglen, S, 2026. Fine-scale heterogeneity and local amplification of West Nile virus in urban environments in Berlin. *Nature Communications* 17, 4597. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1038/s41467-026-73251-5>

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>

PIK (Potsdam Institute for Climate Impact Research), 2024. Stopping climate change protects human health – a major project helps to pool the knowledge. Abrufbar unter: <https://www.pik-potsdam.de/en/institute/departments/climate-economics-and-policy/mcc-archive/mcc-news-3255>

Public Health Scotland, 2023. Working together to build climate-resilient, healthy and equitable places. A briefing for local government and partners. Abrufbar unter: <https://adaptation.scot/app/uploads/2024/09/climate-adaptation-and-health-inequalities-briefing.pdf>

Ramchandani R, Oluwasanya G, Nunbogu AM, Madani K, 2026. Adapting health systems for water bankruptcy. *British Medical Journal* 393, e812317. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1136/bmj-2026-812317>

Rocque R J, Beaudoin C, Ndjaboue R, Cameron L, Poirier-Bergeron L, Poulin-Rheault RA, Fallon C, Tricco AC, Witteman, HO, 2021. Health effects of climate change: an overview of systematic reviews. *British Medical Journal Open* 11, e046333. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-046333>

Schmidt M, Schindler D, Arneth A, Kesselring S, Löbbe S, Pehnt M, 2025. Stellungnahme gemäß § 16 Absatz 2 KlimaG BW des Klima-Sachverständigenrat Baden-Württemberg zum Monitoringbericht 2025 zur Anpassungsstrategie Baden-Württemberg. Abrufbar unter: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/4_Klima/Klimaschutz/Klima-Sachverstaendigenrat/250214-K-SVR-Stellungnahme-Monitoringbericht-2025-zur-Anpassungsstrategie-BW.pdf (Zugriff am 20.06.2026)

Schmidt M, Schindler D, Arneth A, Angenendt E, Kesselring S, Pehnt M, 2026. Klimawandelbedingte Veränderungen des Wasserhaushalts in Baden-Württemberg: Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit. Impulspapier des Klima-Sachverständigenrats Baden-Württemberg. Abrufbar unter: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/4_Klima/Klimaschutz/Klima-Sachverstaendigenrat/20260420-Impulspapier-Klima-Sachverstaendigenrat-Wasserverfuegbarkeit.pdf (Zugriff am 20.06.2026)

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/10.1080/01621459.1968.10480934>

Seneviratne SI, Corti T, Davin EL, Hirschi M, Jaeger EB, Lehner I, Orlowsky B, Teuling AJ, 2010. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. Earth-Science Reviews 99, 125–161. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>

Theil H, 1992. A Rank-Invariant Method of Linear and Polynomial Regression Analysis. In: Raj, B., Koerts, J. (Hrsg.) 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), 2023. Strategie zur Anpassung an den Klimawandel in Baden-Württemberg – Fortschreibung. Abrufbar unter: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/4_Klima/Klimawandel/AnpassungsstrategieBW-2023.pdf (Zugriff am 20.06.2026)

UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction), 2026. Extreme heat portal. Abrufbar unter: <https://www.preventionweb.net/hubs/extreme-heat> (Zugriff am 20.06.2026)

Walther GR, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee TJC, Fromentin J-M, Hoegh-Guldberg O, Bairlein F, 2002. Ecological responses to recent climate change. Nature 416, 389–395. <https://doi.org/10.1038/416389a>

WMO (World Meteorological Organization), 2026. Extreme heat pushes agrifood systems to the brink. Abrufbar unter: <https://wmo.int/news/media-centre/extreme-heat-pushes-agrifood-systems-brink> (Zugriff am 20.06.2026)

Yoon D, Chen JH, Hsu H, Findell KL, 2026. Variations in land-atmosphere coupling during drought-heatwave events. Communications Earth & Environment 7, 1. Abrufbar unter: <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02977-9>

MEHR INFORMATIONEN

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



KLIMA-SACHVERSTÄNDIGENRAT
BADEN-WÜRTTEMBERG