

Der Klimawandel in Baden-Württemberg

1. Klimaszenarien Baden-Württemberg 2021 – 2050

Es ist unbestritten, dass sich durch den anthropogen verursachten „Treibhauseffekt“ in den nächsten ca. 100 Jahren u.a. die mittlere globale Temperatur um 1,4 bis 5,8°C erhöhen wird. Dies ist eine zentrale Aussage im 3. Bericht des zwischenstaatlichen Sachverständigenrats „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) vom Januar 2001. Diese Klimaveränderung wird mit erheblichen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt verbunden sein. Allgemein führt ein Temperaturanstieg zu einer Intensivierung des Wasserkreislaufs, was sich in erhöhter Verdunstung und höheren Niederschlägen äußern kann.

Der vorliegende Bericht fasst die derzeit vorliegenden Erkenntnisse über die Auswirkungen des Klimawandels für das Land Baden-Württemberg zusammen. Diese Erkenntnisse wurden im Rahmen des Projekts **KLIWA** (Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft) gewonnen. **KLIWA** ist ein Kooperationsvorhaben der Länder Bayern und Baden-Württemberg mit dem Deutschen Wetterdienst.

Ziel von **KLIWA** ist, für die nächsten Jahrzehnte, d.h. für den Zeithorizont 2021-2050, Aussagen über die möglichen Auswirkungen der Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt zu erhalten. Diese Aussagen sollen dann als Basis für die Ermittlung der Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, d.h. für wasserwirtschaftliche Handlungsempfehlungen dienen.

Für die Abschätzung sind geeignete regionale Klimaszenarien mit einem realitätsnahen Emissionsszenario des IPCC erstellt worden. Diese Szenarien wurden in Baden-Württemberg als Eingangsgrößen für die verfügbaren Wasserhaushaltsmodelle (WHM) verwendet, um Aussagen über die Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt treffen zu können. Die Klimaszenarien wurden für den Bereich der Länder Baden-Württemberg und Bayern erstellt.

Eine im Auftrag von **KLIWA** erstellte Grundsatzstudie der ETH Zürich zog das Fazit, dass es noch kein optimales Verfahren für die Erstellung regionaler Klimaszenarien aus den globalen Klimamodellen gibt. Auch der **KLIWA**-Workshop „Klimaszenarien“ am 14.05.2001 in Berlin zeigte, dass derzeit keine gesicherte Methode für die Ermittlung von regionalen Klimaszenarien zur Verfügung steht. Daher beschlossen die KLIWA-Partner, drei unterschiedliche Verfahren anzuwenden, um eine Bandbreite möglicher Entwicklungen zu erhalten.

Es wurden folgende Verfahren ausgewählt:

- das regionale dynamische Klimamodell REMO des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI), Hamburg
- ein spezielles statistisches Verfahren (unter Berücksichtigung von Wetterlagen) der Fa. Meteo-Research, Berlin
- die statistische Methode des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK), Potsdam.

Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurden in den Aufträgen an die Klimamodellierer weitgehend identische Randbedingungen vorgegeben: Messdaten 1951-2000, globales Klimamodell ECHAM 4, Verifikationszeitraum 1971-2000, IPCC-Emissionsszenario B2, Szenariozeitraum 2021-2050.

2. Ergebnisse

Die nachfolgenden Aussagen konzentrieren sich auf den Bereich des Landes Baden-Württemberg und stützen sich auf die Ergebnisse aller drei Verfahren. Die flächenhaften Darstellungen zeigen wegen der weitgehenden klimatologischen Homogenität das gesamte **KLIWA**-Gebiet Baden-Württemberg und Bayern.

Die angewandten Verfahren zur Ermittlung der regionalen Klimaszenarien befinden sich in der Weiterentwicklung. Die Ergebnisse weisen daher zwar noch Unsicherheiten auf, die Tendenzen der ermittelten Änderungen der wichtigsten hydrometeorologischen Größen wie Temperatur und Niederschlag aber weisen in allen drei Verfahren in die gleiche Richtung.

2.1 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur wird in Baden-Württemberg auch in der Zukunft weiter deutlich zunehmen. Im Sommerhalbjahr wird die mittlere Tagestemperatur ca. 15°C betragen (Bild 1), im Winter ca. 4,5°C (Bild 3). Die Zunahmen fallen im hydrologischen Winter mit ca. 2°C (Bild 4) stärker aus als im hydrologischen Sommer mit ca. 1,4°C (Bild 2). Der hydrologische Winter dauert von November bis April, der hydrologische Sommer von Mai bis Oktober.

Die Temperaturerhöhung ist auch bei den einzelnen Monaten zu erkennen, und zwar nicht nur bei den mittleren, sondern auch bei den maximalen und minimalen Tagestemperaturen. Sie ist in den Monaten Dezember bis Februar am höchsten. Die Unterschiede zwischen der Istzeit (1961-2000) und der Zukunft (2021-2050) sind beispielhaft für die Klimastation Freudenstadt in den Bildern 5 bis 7 dargestellt.

Die erwartete Temperaturzunahme im Winter ist von besonderer Bedeutung, da die Temperatur großen Einfluss auf die Zwischenspeicherung von Niederschlag als Schnee hat und somit entscheidend für die zukünftig zu erwartenden Abflussverhältnisse sein kann.

2.2 Sommertage und heiße Tage

Die Anzahl der Sommertage (Tage mit $T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) in Baden-Württemberg wird deutlich steigen. Dies ist aus Bild 8 ersichtlich; dort sind die Mittelwerte an den einzelnen Klimastationen des Landes dargestellt. Auch die Anzahl der heißen Tage (Tage mit $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) wird – teilweise um nahezu das Doppelte – zunehmen (Bild 9).

2.3 Frost- und Eistage

Infolge der Klimaerwärmung wird die Zahl der Frosttage (Tage mit $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) (Bild 10) und auch die Zahl der Eistage (Tage mit $T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$) wird deutlich abnehmen, letztere größtenteils um mehr als die Hälfte (Bild 11).

2.4 Spätfrost im Frühjahr

Spätfroste im Frühjahr können je nach Zeitpunkt große Schäden in der Landwirtschaft verursachen. Auf Grund der erwarteten Erwärmung wird der letzte Frost im Frühjahr im Mittel früher auftreten als derzeit, so dass sich für die Landwirtschaft die Gefahr von Frostschäden verringern könnte. In Bild 12 ist der derzeitige Zustand flächenhaft dargestellt (in Tagen ab Jahresbeginn); die künftige Verschiebung (in Tagen) ist an den Standorten der Messstationen angegeben.

2.5 Niederschlag

Trotz der räumlichen Unschärfe sind regionale Unterschiede beim Niederschlag erkennbar und daher Aussagen dazu zulässig. Die Bilder 13 und 14 zeigen, dass sich die Niederschläge im Sommer in Baden-Württemberg wenig verändern werden (überwiegend geringfügige Abnahmen in der Größenordnung von weniger als 10%). Die Winterniederschläge jedoch werden deutlich zunehmen. Je nach Region beträgt die unterschiedlich stark ausgeprägte Zunahme bis zu 35% (Bilder 15 und 16).

Ebenfalls steigen wird die Zahl der Tage mit hohen Niederschlägen (≥ 25 mm) im Winter. Das Beispiel der Klimastation Freudenstadt zeigt, dass in den Monaten Dezember bis Februar die Zahl der Tage mit $N \geq 25$ mm im Mittel um ca. das Doppelte zunimmt (Bild 20).

2.6 Trockenperioden

Für die Landwirtschaft ist bedeutsam, dass künftig die Anzahl der Trockenperioden (mindestens 11 aufeinander folgende Tage mit einem Niederschlag von weniger als 1 mm) pro Jahr abnimmt. Ebenso wird die Anzahl der Trockentage (Niederschlag weniger als 1 mm) geringer (Bild 17). Dieses Verhalten zeigt sich auch bei den monatlichen Werten, wie am Beispiel der Klimastation Freudenstadt zu erkennen ist (Bild 19). Die mittlere Dauer der Trockenperioden nimmt künftig ebenfalls nicht zu (Bild 18).

Diese Tendenz zur Abnahme wurde für die letzten Jahrzehnte bereits in der Untersuchung des Langzeitverhaltens der Niederschläge festgestellt.

2.7 Wetterlagen

Im Winter werden die Häufigkeit und Dauer der für die Hochwasserbildung bedeutsamen Westwetterlagen, insbesondere die so genannte „Westlage zyklonal (WZ)“, zunehmen. Im Sommer sind keine größeren Änderungen zu erwarten.

2.8 Abfluss

Die Ergebnisse der regionalen Klimaszenarien wurden als Eingangsgrößen für die Wasserhaushaltsmodelle genutzt, um den Einfluss der Klimaveränderung auf die Abflüsse mit Hilfe von statistischen Berechnungen (Extremwertstatistik) abzuschätzen.

Die Auswertungen der Landesanstalt für Umweltschutz, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) zeigen, dass die Hochwasserabflüsse an fast allen Pegeln zunehmen werden. Bei der Bemessung neuer wasserwirtschaftlicher Anlagen ist es daher aus heutiger Sicht notwendig, die Auswirkungen des Klimawandels durch einen „Klimaänderungsfaktor“ zu berücksichtigen. Dies geschieht durch einen Zuschlag zum Bemessungswert.

Im Flusseinzugsgebiet des Neckars beispielsweise, das zunächst als Pilotgebiet untersucht wurde, wird die Zunahme beim hundertjährigen Hochwasserabfluss HQ_{100} rund 15 % betragen. Unter HQ_{100} versteht man den Hochwasserabfluss, der statistisch betrachtet, im Durchschnitt alle 100 Jahre einmal auftritt. Künftig wird man daher im Neckargebiet den Wert für HQ_{100} mit dem Klimafaktor 1,15 multiplizieren müssen.

3. Fazit

Insgesamt ist bei kritischer Bewertung der Ergebnisse für das Zieljahr 2050 festzuhalten:

- Die Erwärmung geht weiter. Die Lufttemperatur wird insbesondere im Winter weiter zunehmen.
- Die Niederschläge werden im Winterhalbjahr zunehmen.
- Von diesen Veränderungen ist auch der Wasserkreislauf, insbesondere der Abfluss in den Gewässern, betroffen.
- Auch bei der Dauer und Häufigkeit von Westwetterlagen ist im Winter mit einer Zunahme zu rechnen.

In Baden-Württemberg hat die LUBW die Berechnungen mit den Wasserhaushaltsmodellen für die alle Flussgebiete (Neckar, Donau, Tauber, Bodenseezuflüsse, Hoch- und Oberrheinzufüsse) durchgeführt. Ziel war es, mit pragmatischen Ansätzen für diese Gebiete Klimaänderungsfaktoren festzulegen (siehe „Lastfall Klimaänderung“).

Die Unsicherheiten bei den Ergebnissen aus der Modellkette

Globale Klimamodelle ⇒ Regionale Klimamodelle ⇒ Wasserhaushaltsmodelle

und der anschließenden Extremwertstatistik sind zwar noch groß, dennoch lassen die Ergebnisse der Simulationsrechnungen in den betreffenden Einzugsgebieten eine Zunahme der mittleren Hochwasser, aber auch der extremen Abflüsse erwarten. Eine Hochwasserverschärfung durch die Klimaveränderung erscheint für das Zieljahr 2050 somit wahrscheinlich.

Die bisherigen Untersuchungen in **KLIWA** geben Anlass, den bisherigen Weg bei der Festlegung von Bemessungsabflüssen zu modifizieren und aufgrund des Klimawandels einen „Lastfall Klimaänderung“ zu berücksichtigen.

Lastfall Klimaänderung

Anhand von Fallbeispielen aus der Praxis wurde nachgewiesen, dass eine Berücksichtigung der Auswirkungen der Klimaänderung in den meisten Fällen zu relativ moderaten Kostenerhöhungen geführt hätte, wenn dieser Lastfall bereits bei der Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen berücksichtigt und beim Bau zumindest entsprechende Vorkehrungen für eine spätere Anpassung getroffen worden wären. Spätere Anpassungen sind jedoch meist mit sehr hohen Kosten verbunden.

Der Lastfall Klimaänderung soll deshalb zukünftig bei Planungen von technischen Hochwasserschutzmaßnahmen mit untersucht werden. Es ist aufzuzeigen, welche Konsequenzen sich durch den Lastfall auf die Auslegung der Maßnahmen ergeben und welche Mehrkosten dadurch zu erwarten sind. Aufgrund der dann vorliegenden Erkenntnisse soll entschieden werden, inwieweit der Lastfall Klimaänderung bereits in der Planung berücksichtigt wird. Dabei sind auch Möglichkeiten für eine spätere Anpassung in Betracht zu ziehen.

Bei der Bemessung neuer wasserwirtschaftlicher Anlagen ist es daher notwendig, die Auswirkungen des Klimawandels zu untersuchen. Dies erfolgt durch einen Zuschlag zum Bemessungswert, den so genannten Klimaänderungsfaktor.

Um die Größe des Klimaänderungsfaktors abschätzen zu können, wurden in Baden-Württemberg die Ergebnisse der im Rahmen von **KLIWA** erstellten regionalen Klimaszenarien als Eingangsgrößen für Wasserhaushaltsmodelle genutzt. Die so ermittelten Abflüsse aus der Wasserhaushaltsmodellierung wurden vom Institut für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe mit Methoden der Extremwertstatistik aufbereitet. Daraus wurden für verschiedene Jährlichkeiten regionale Klimaänderungsfaktoren festgelegt.

Zusammengefasst über alle untersuchte Jährlichkeiten ergeben sich für Baden-Württemberg die in Bild 21 dargestellten fünf Regionen mit den in Bild 22 aufgelisteten Klimaänderungsfaktoren.

Weitere ausführliche Informationen zum Thema sind im Internet unter www.kliwa.de enthalten.

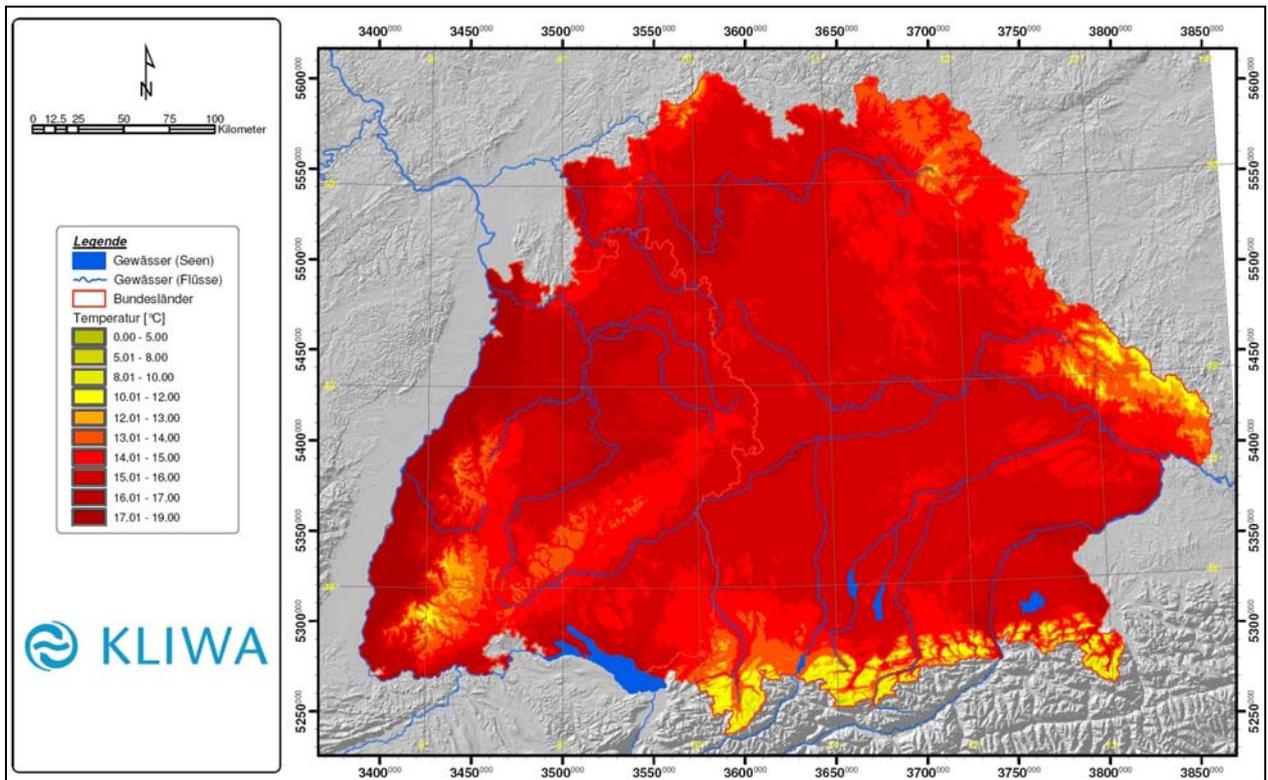


Bild 1: Künftige mittlere Lufttemperatur [°C] im Sommer (2021-2050)

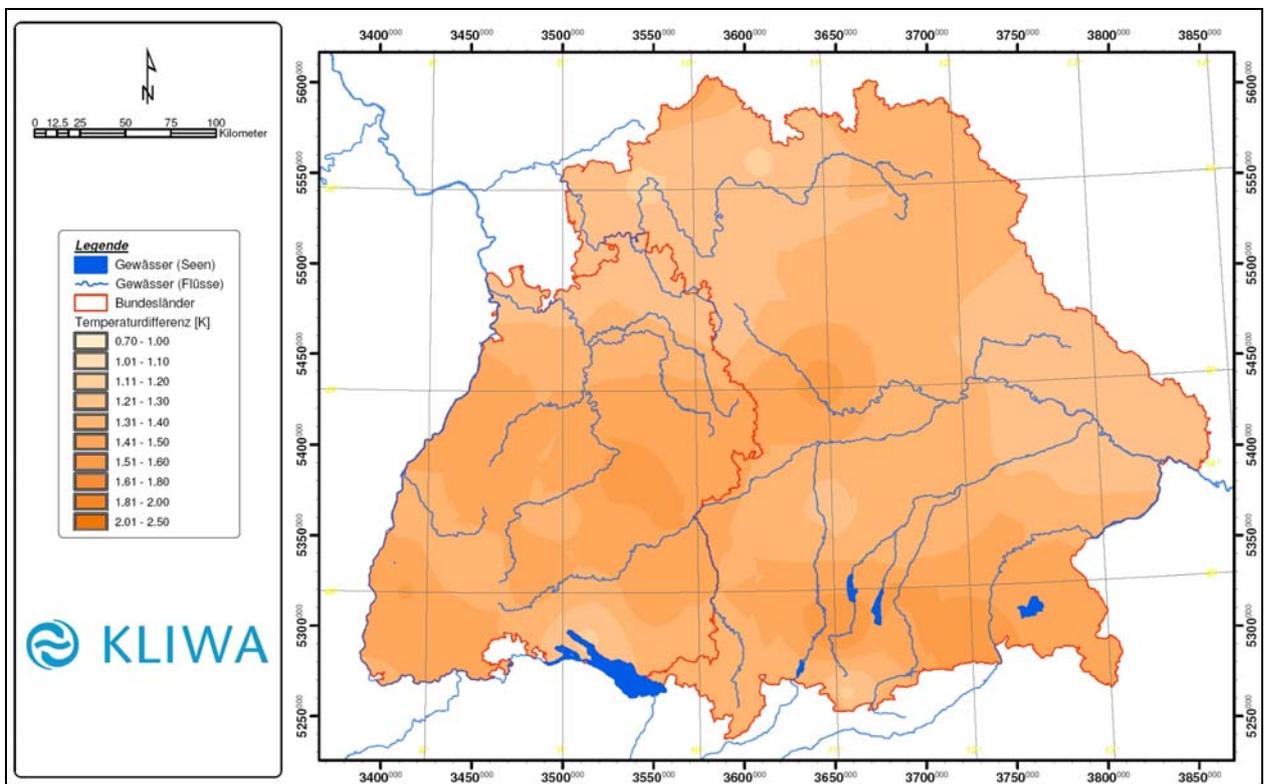


Bild 2: Änderung der künftigen Lufttemperatur [°C] im Sommer gegenüber heute

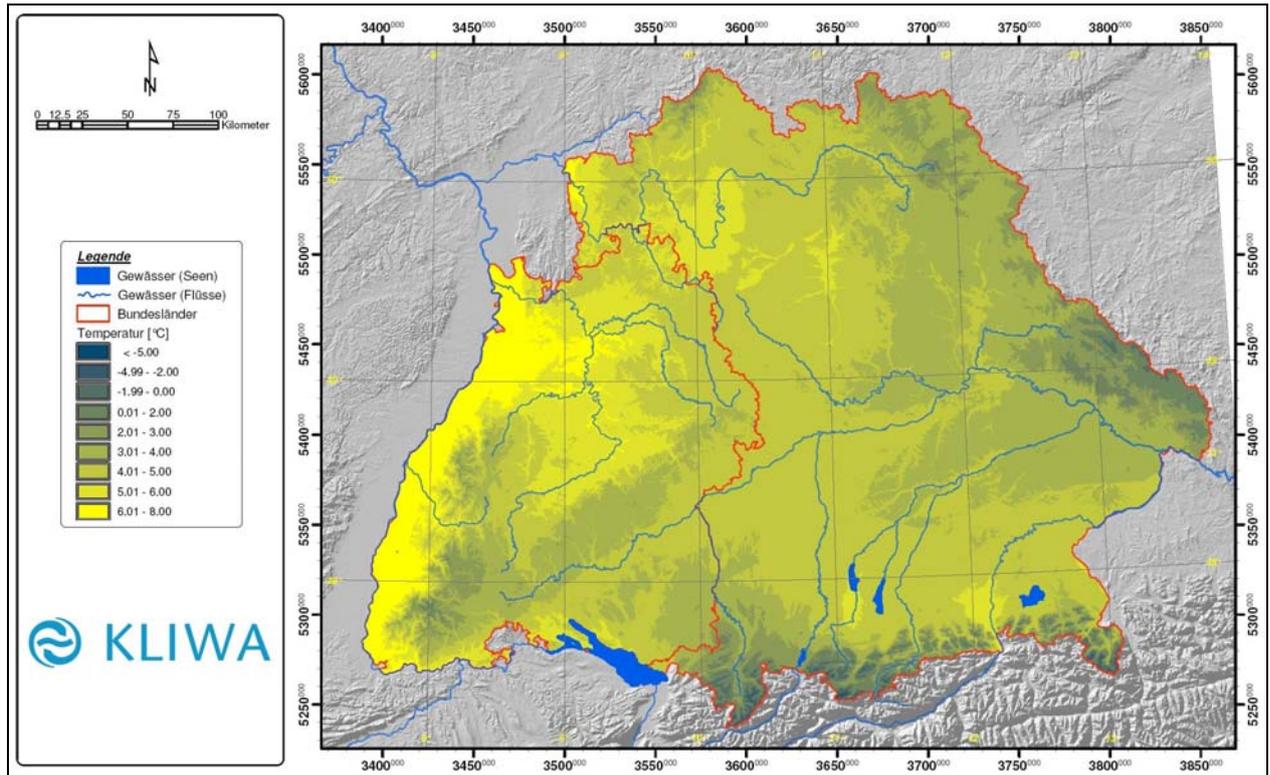


Bild 3: Künftige mittlere Lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$] im Winter (2021-2050)

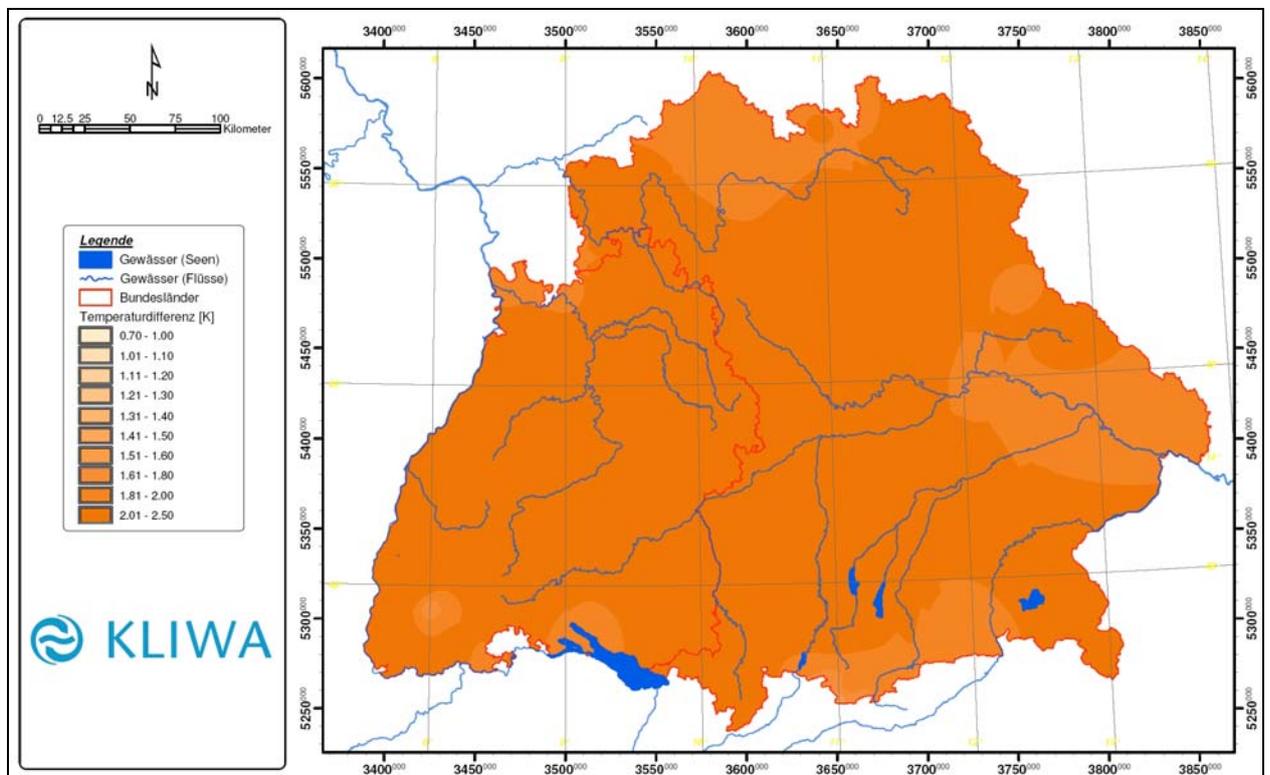


Bild 4: Änderung der künftigen Lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$] im Winter gegenüber heute

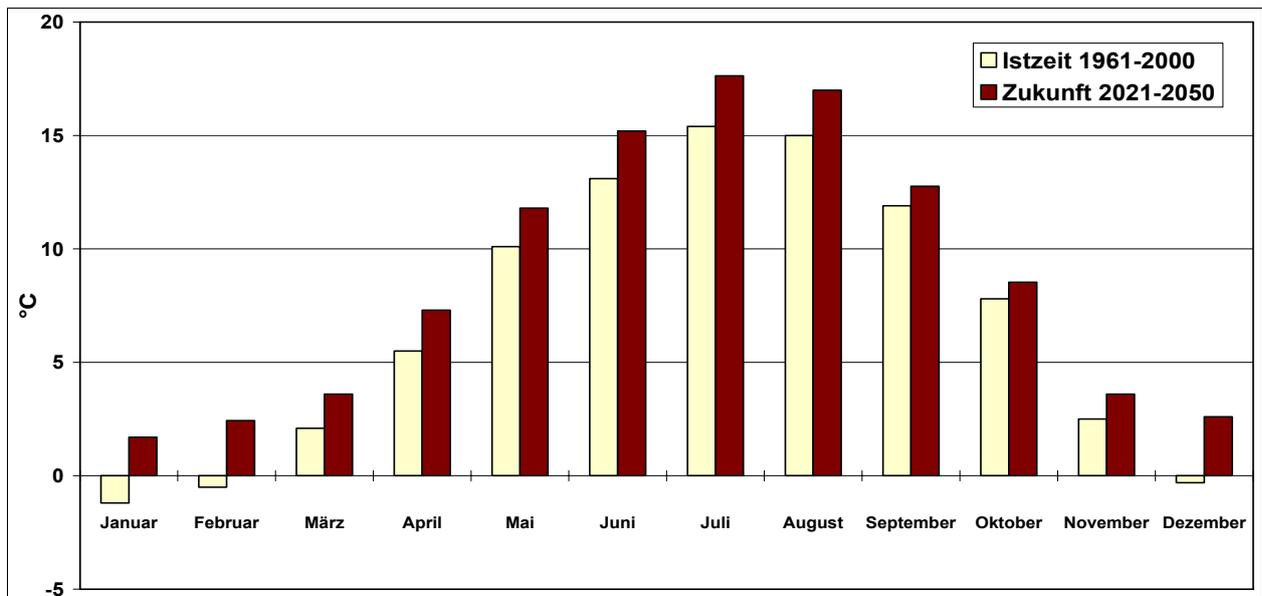


Bild 5: Monatliche mittlere Tagestemperatur in °C, Klimastation Freudenstadt

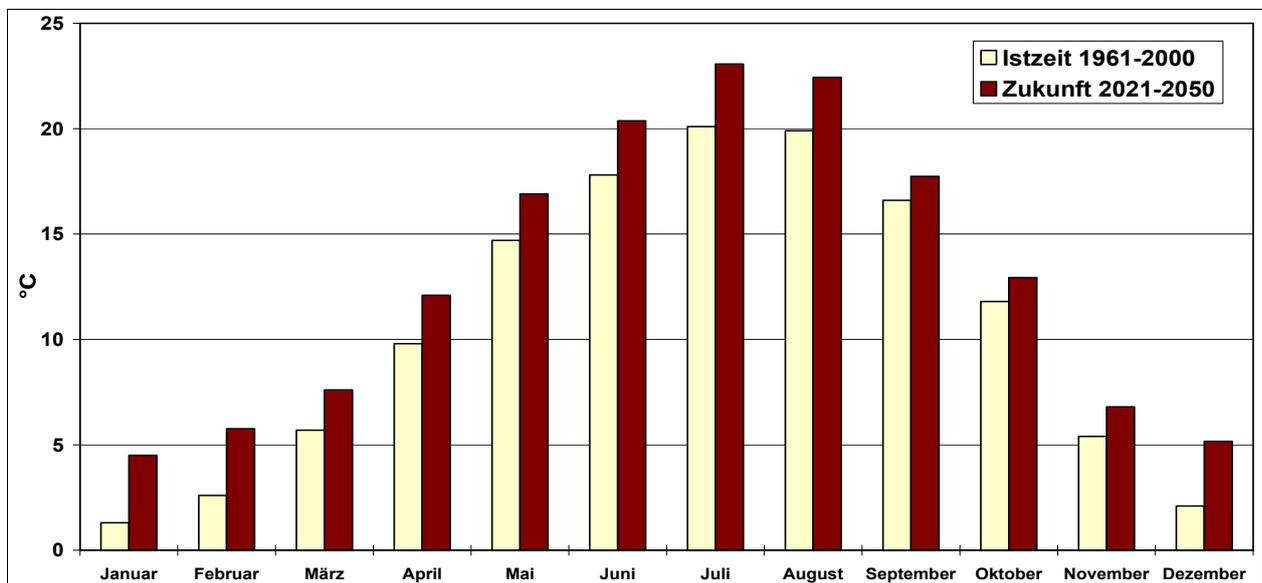


Bild 6: Monatliche maximale Tagestemperatur in °C, Klimastation Freudenstadt

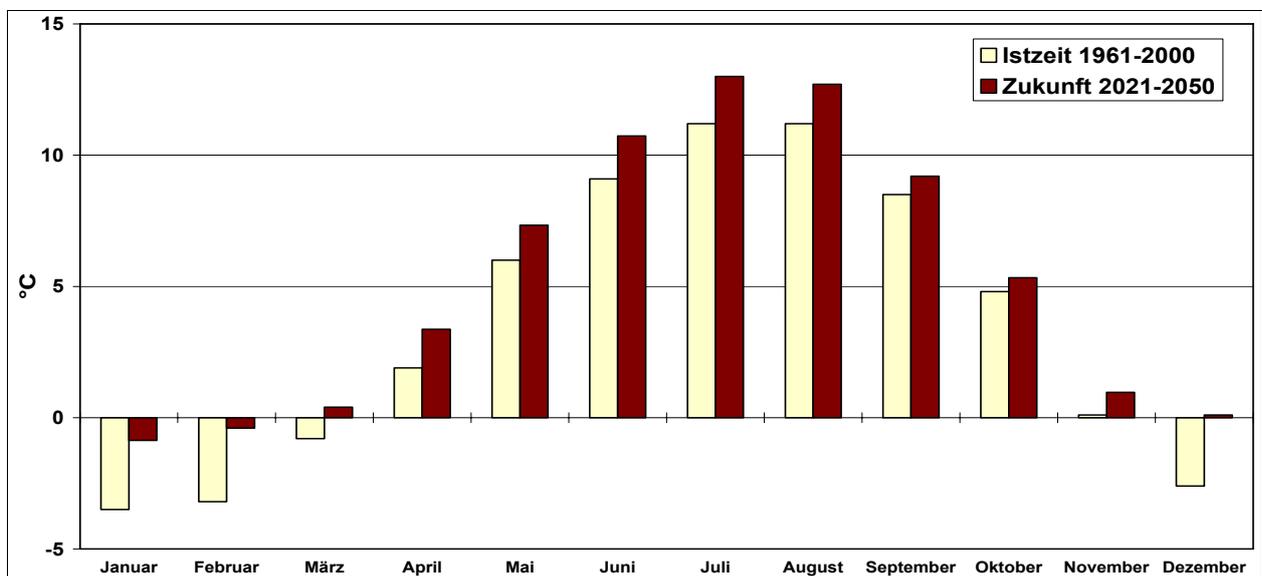


Bild 7: Monatliche minimale Tagestemperatur in °C, Klimastation Freudenstadt

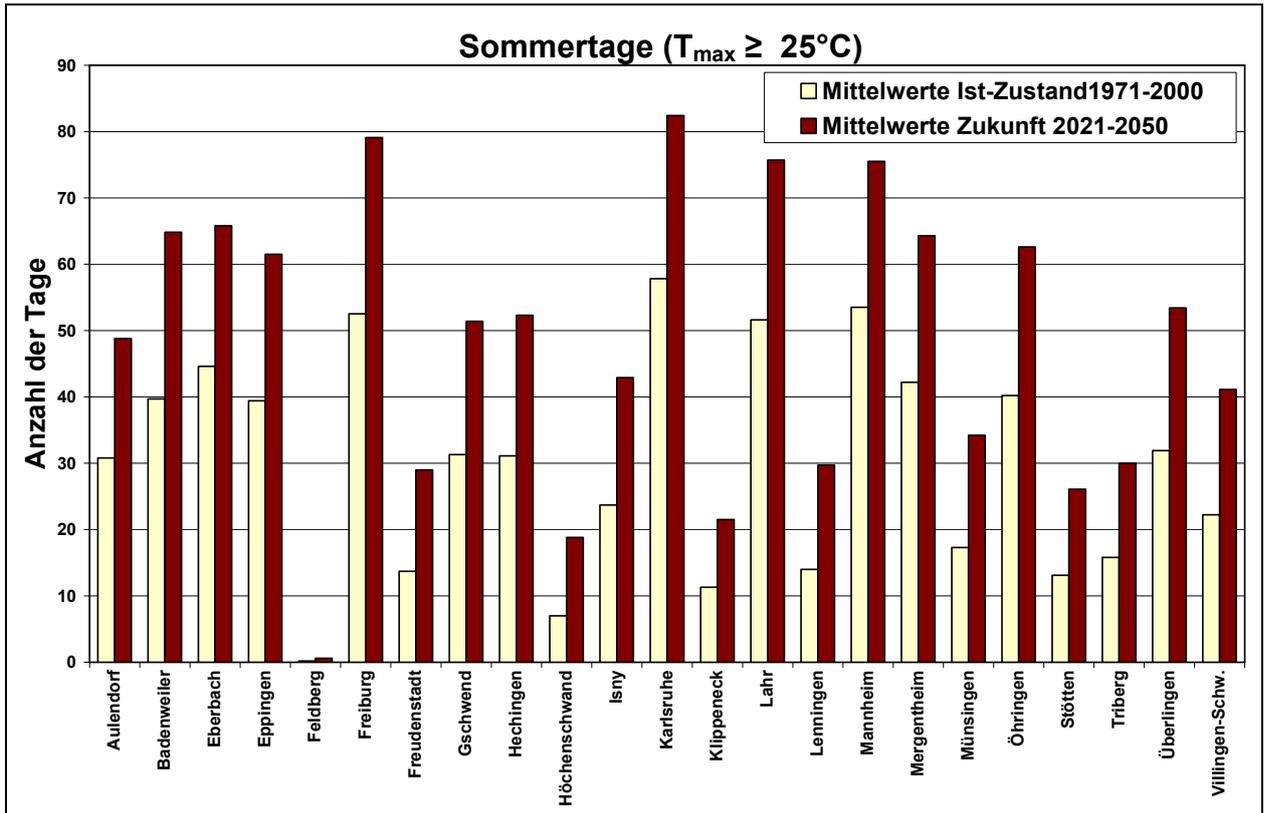


Bild 8: Anzahl der bisherigen und künftigen Sommertage ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) pro Jahr

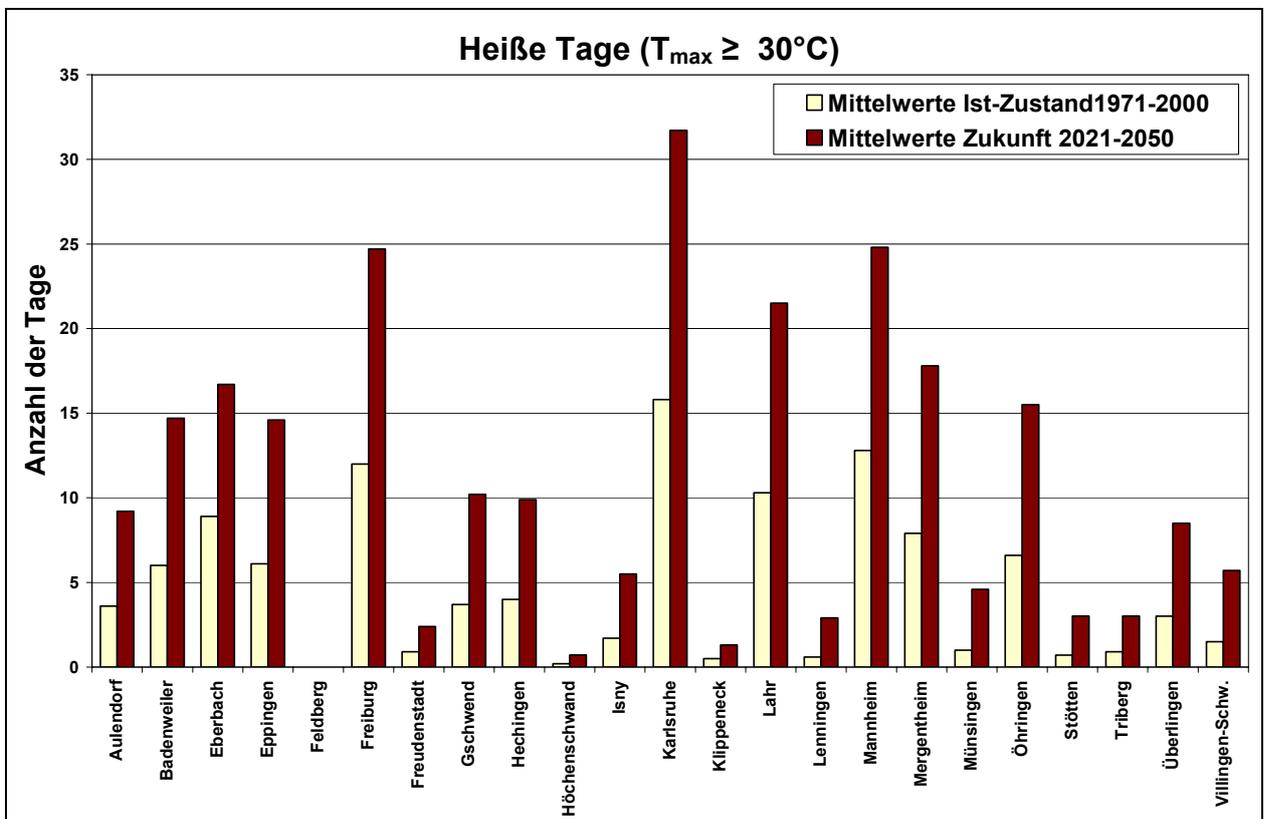


Bild 9: Anzahl der bisherigen und künftigen heißen Tage ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) pro Jahr

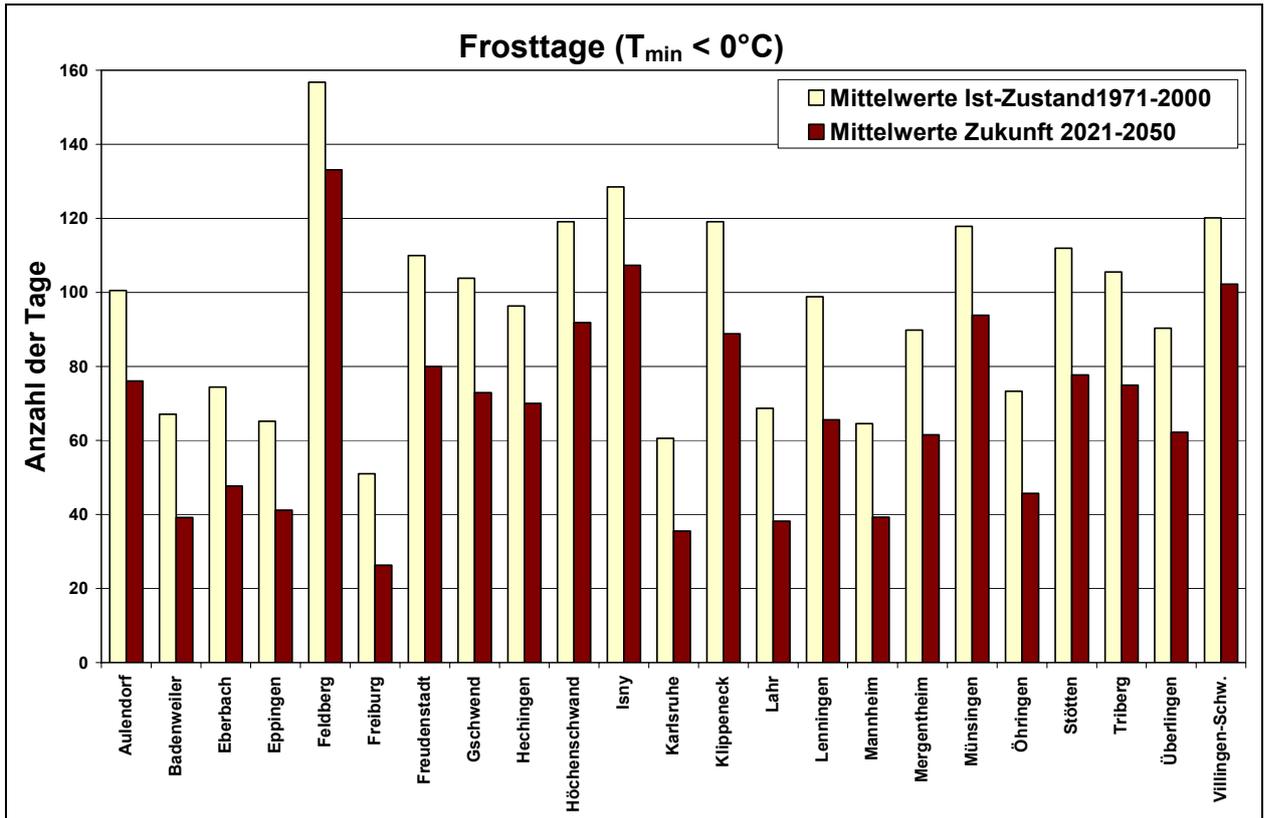


Bild 10: Anzahl der bisherigen und künftigen Frosttage ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) pro Jahr

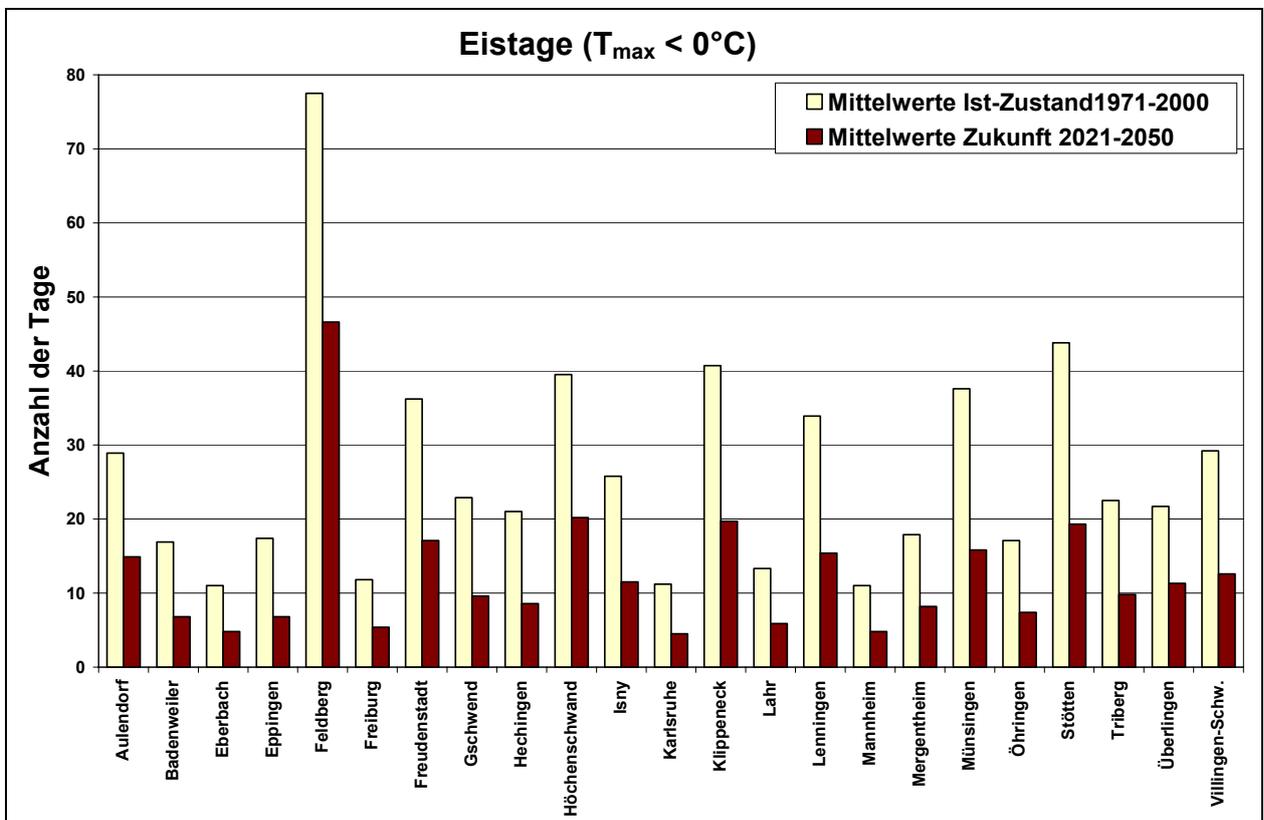


Bild 11: Anzahl der bisherigen und künftigen Eistage ($T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$) pro Jahr

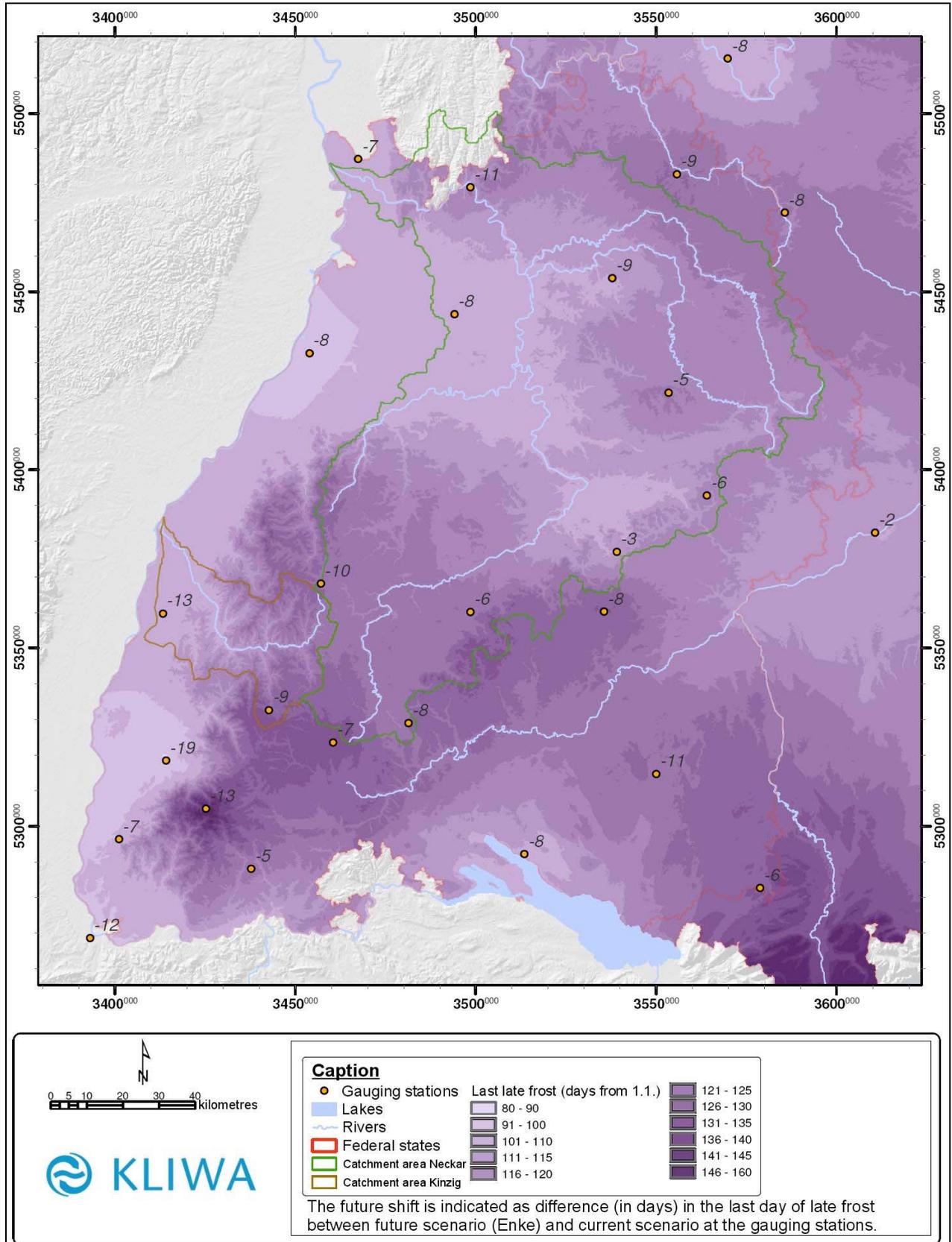


Bild 12: Derzeitiger mittlerer Zeitpunkt des letzten Spätfrostes im Frühjahr und dessen künftige Vorverlegung an den Messstationen

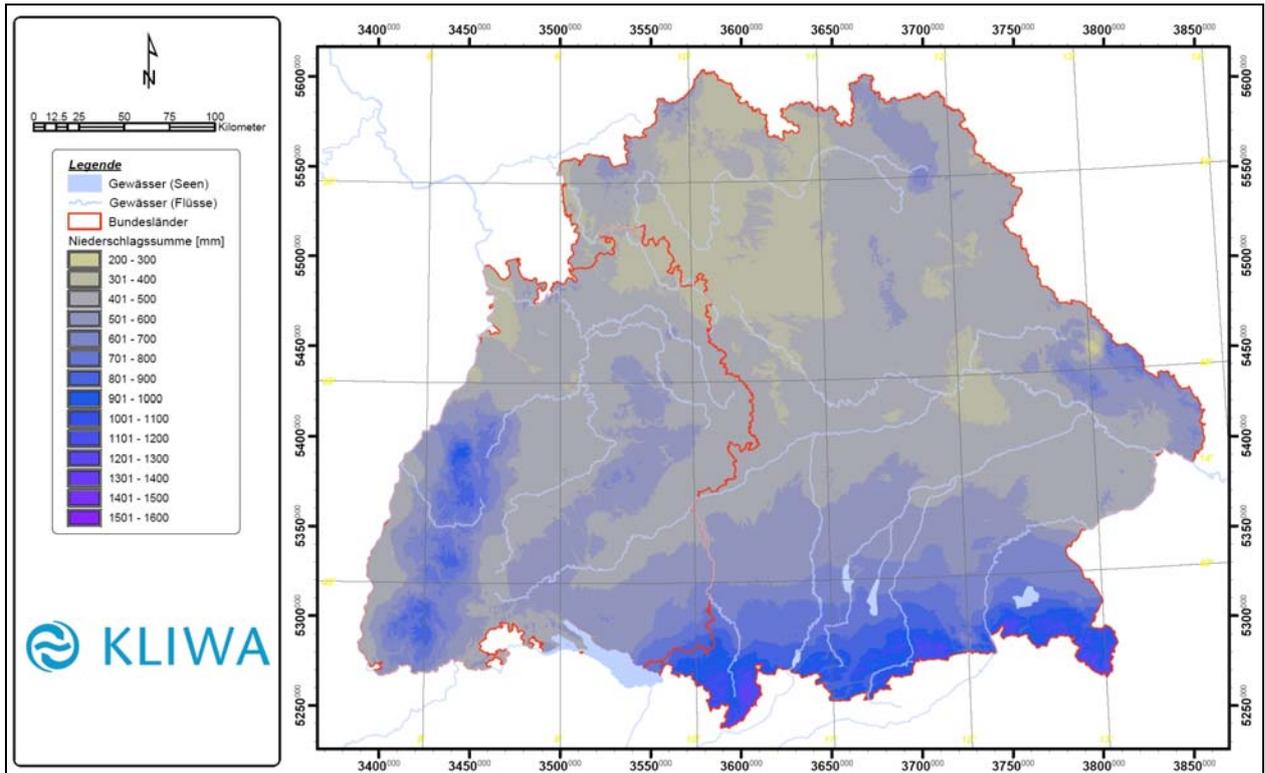


Bild 13: Künftige mittlere Niederschlagssumme [mm] im Sommer (2021-2050)

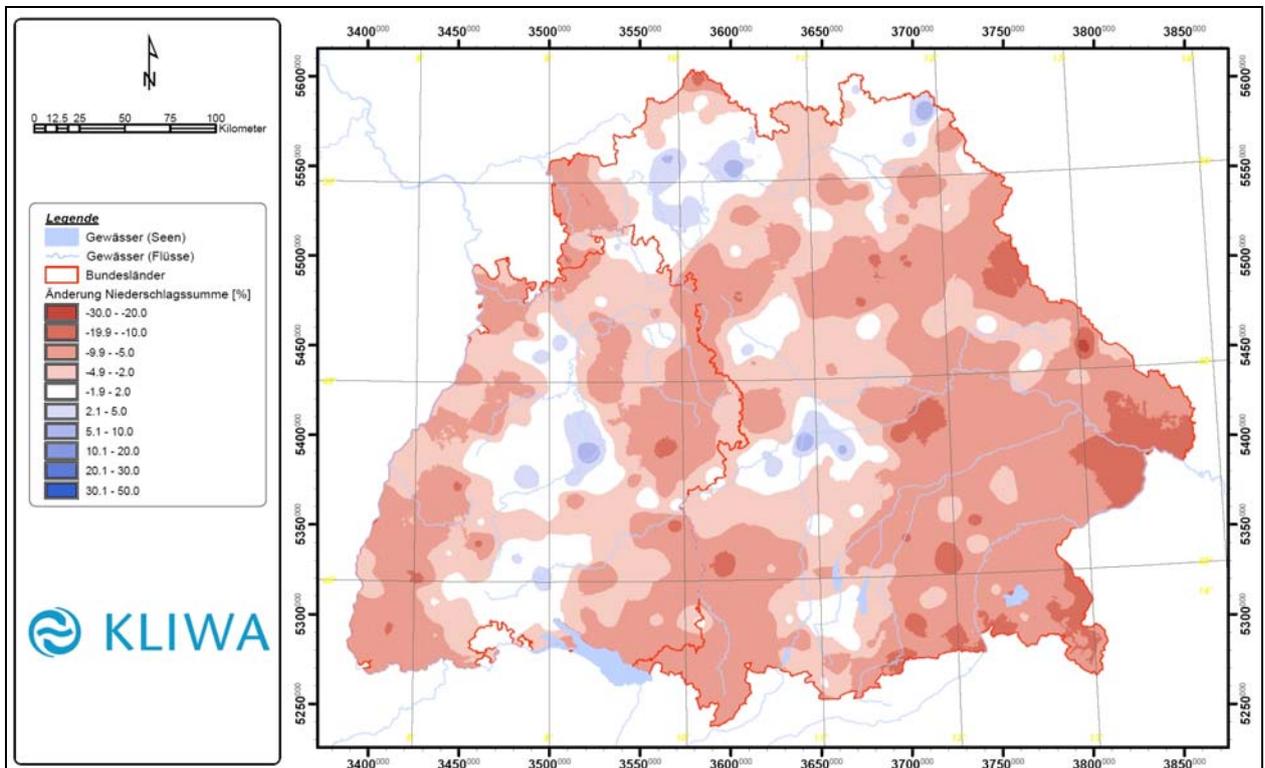


Bild 14: Änderung der künftigen Niederschlagssumme [%] im Sommer gegenüber heute

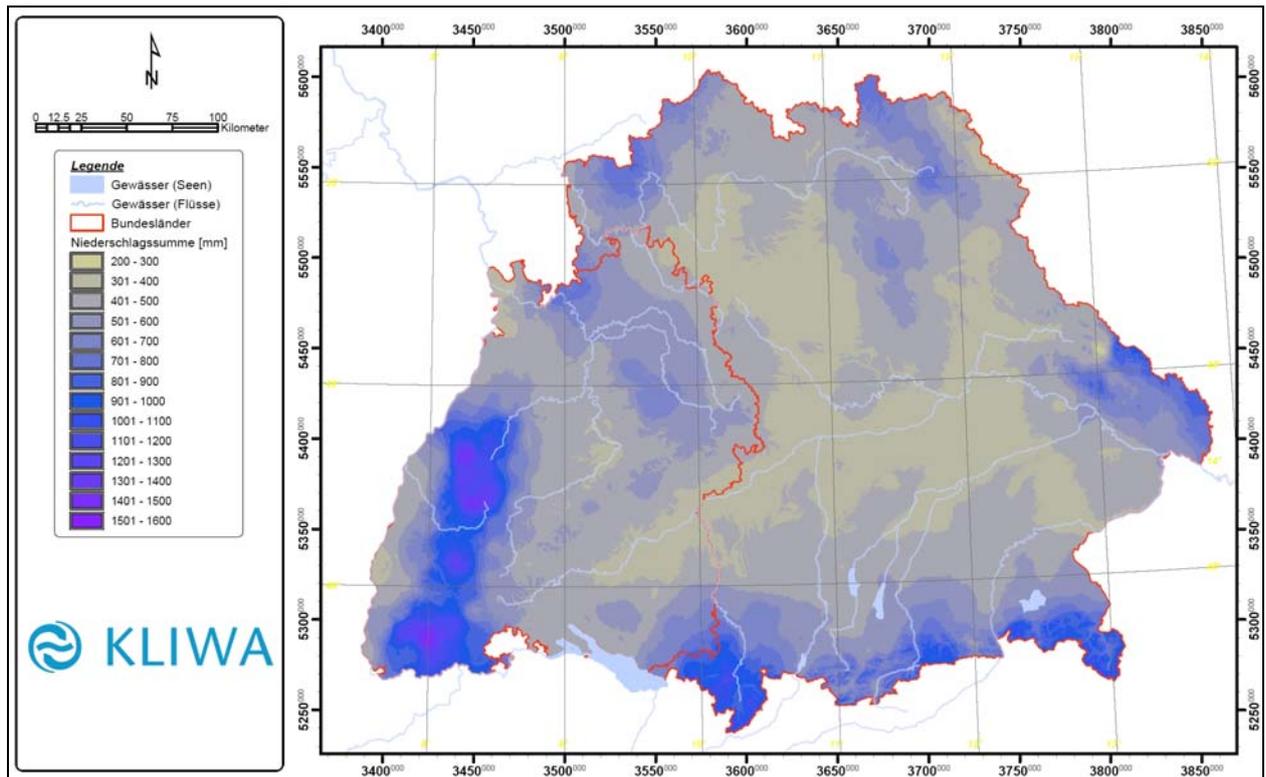


Bild 15: Künftige mittlere Niederschlagssumme [mm] im Winter (2021-2050)

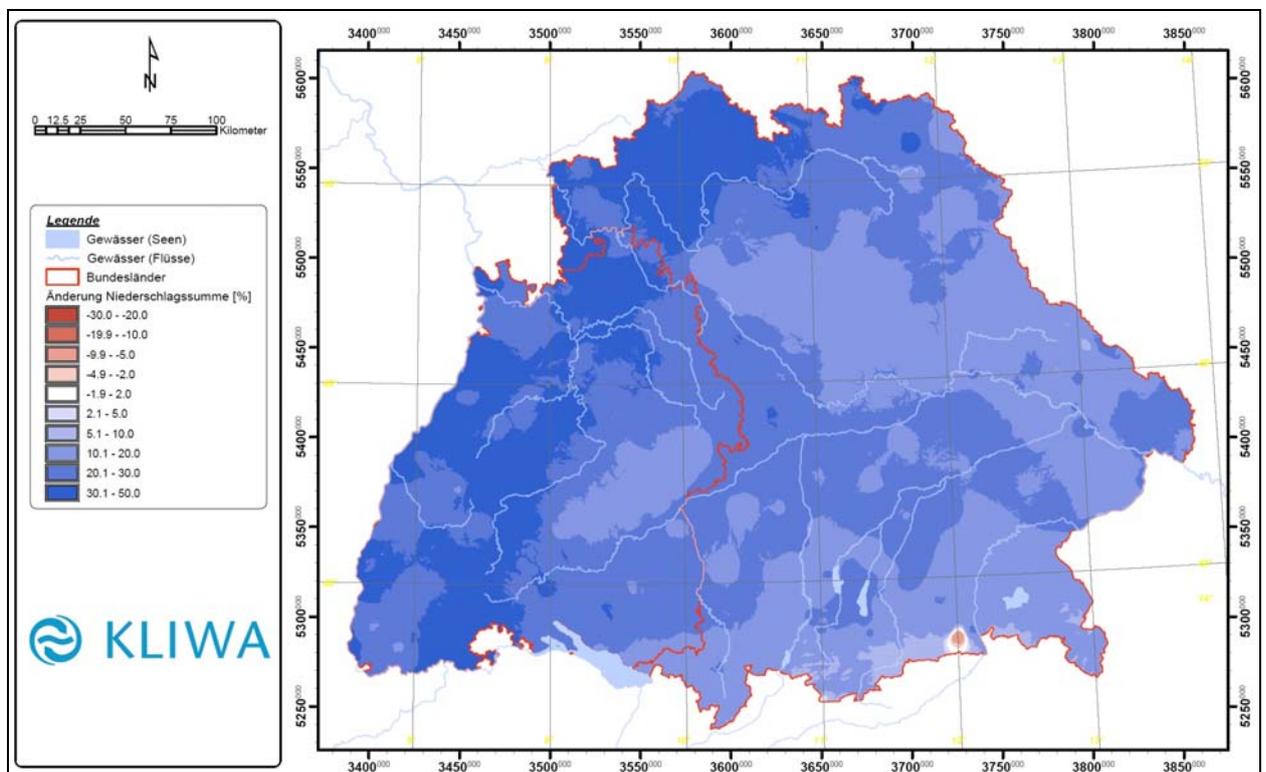


Bild 16: Änderung der künftigen Niederschlagssumme [%] im Winter gegenüber heute

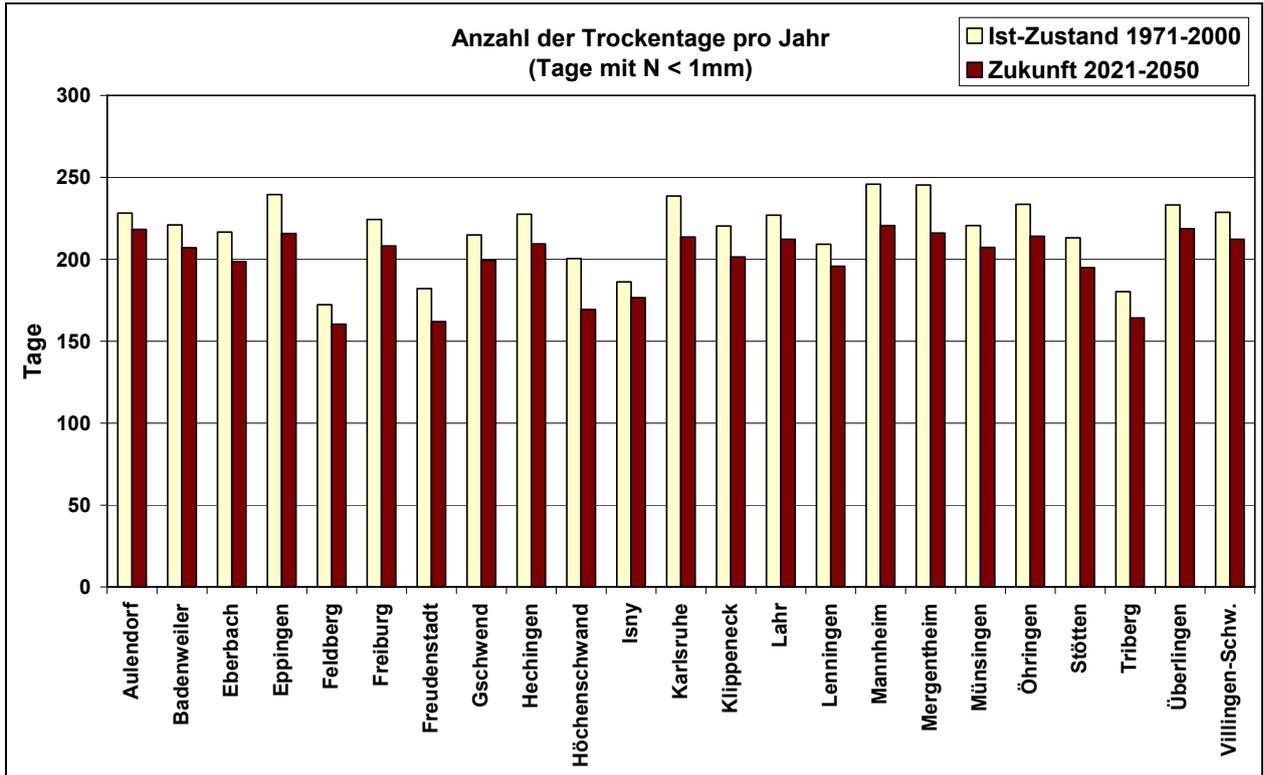


Bild 17: Anzahl der bisherigen und künftigen Trockentage (Niederschlag < 1 mm) pro Jahr

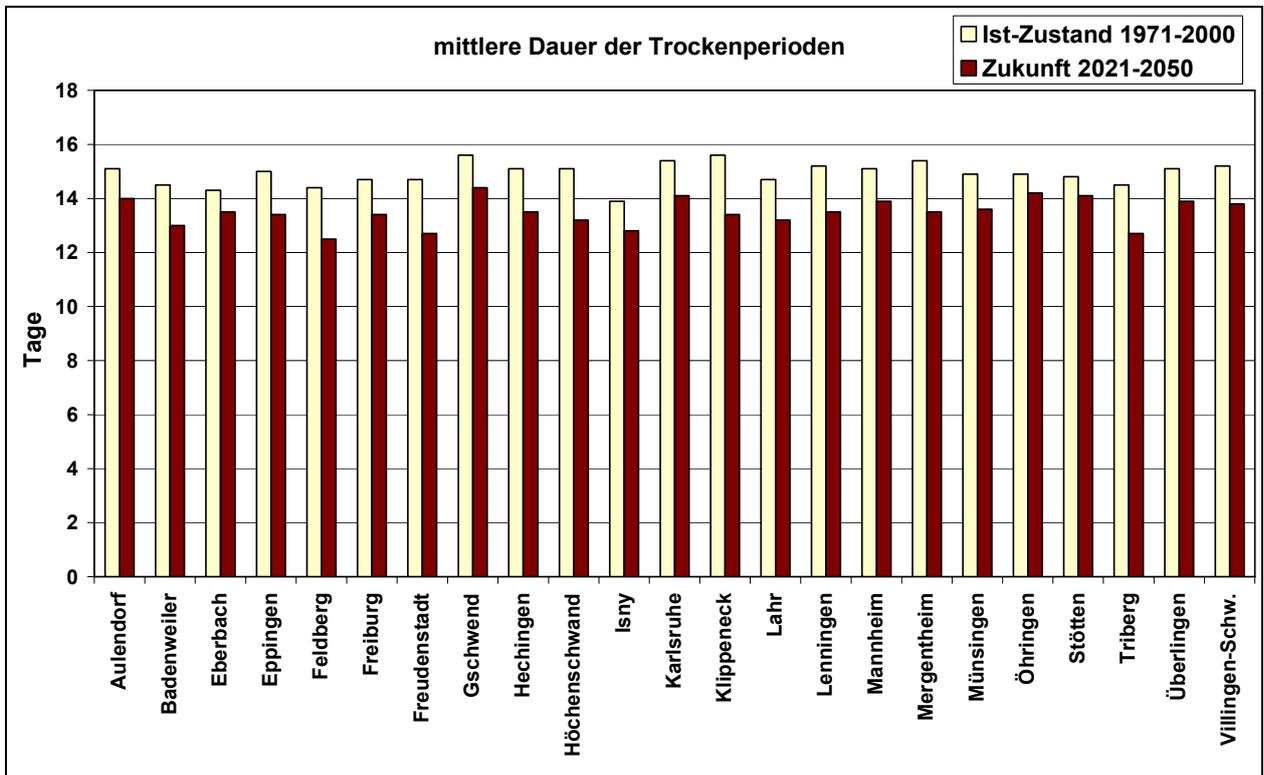


Bild 18: Bisherige und künftige mittlere Dauer der Trockenperioden

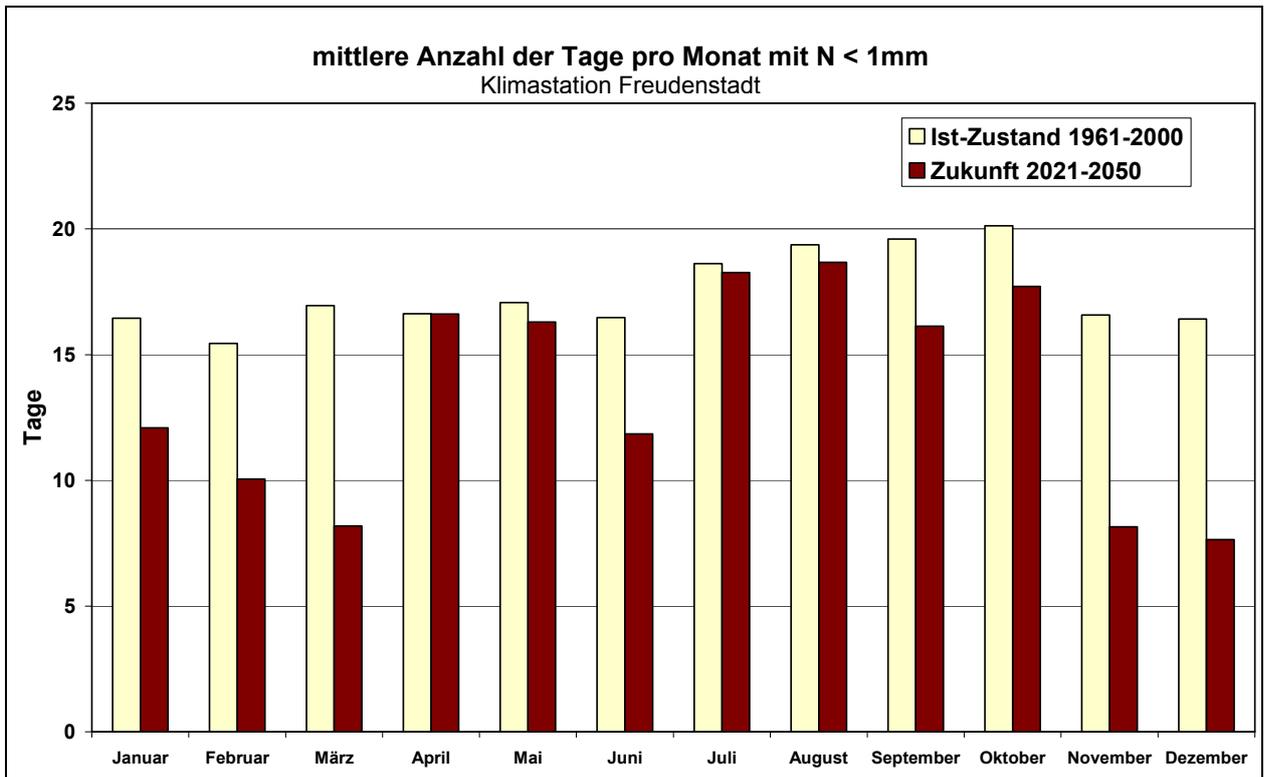


Bild 19: Monatliche mittlere Anzahl der Tage mit Niederschlag $< 1\text{mm}$, Klimastation Freudenstadt

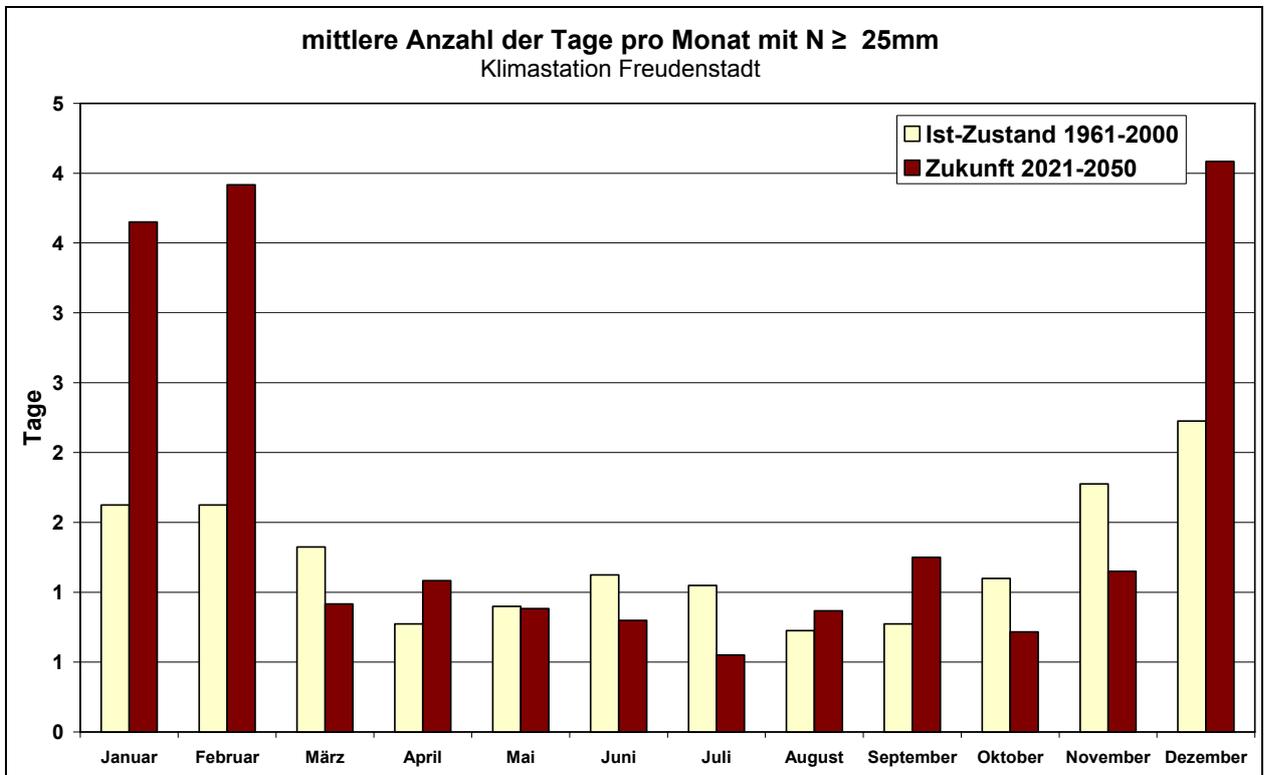


Bild 20: Monatliche mittlere Anzahl der Tage mit Niederschlag $\geq 25\text{mm}$, Klimastation Freudenstadt

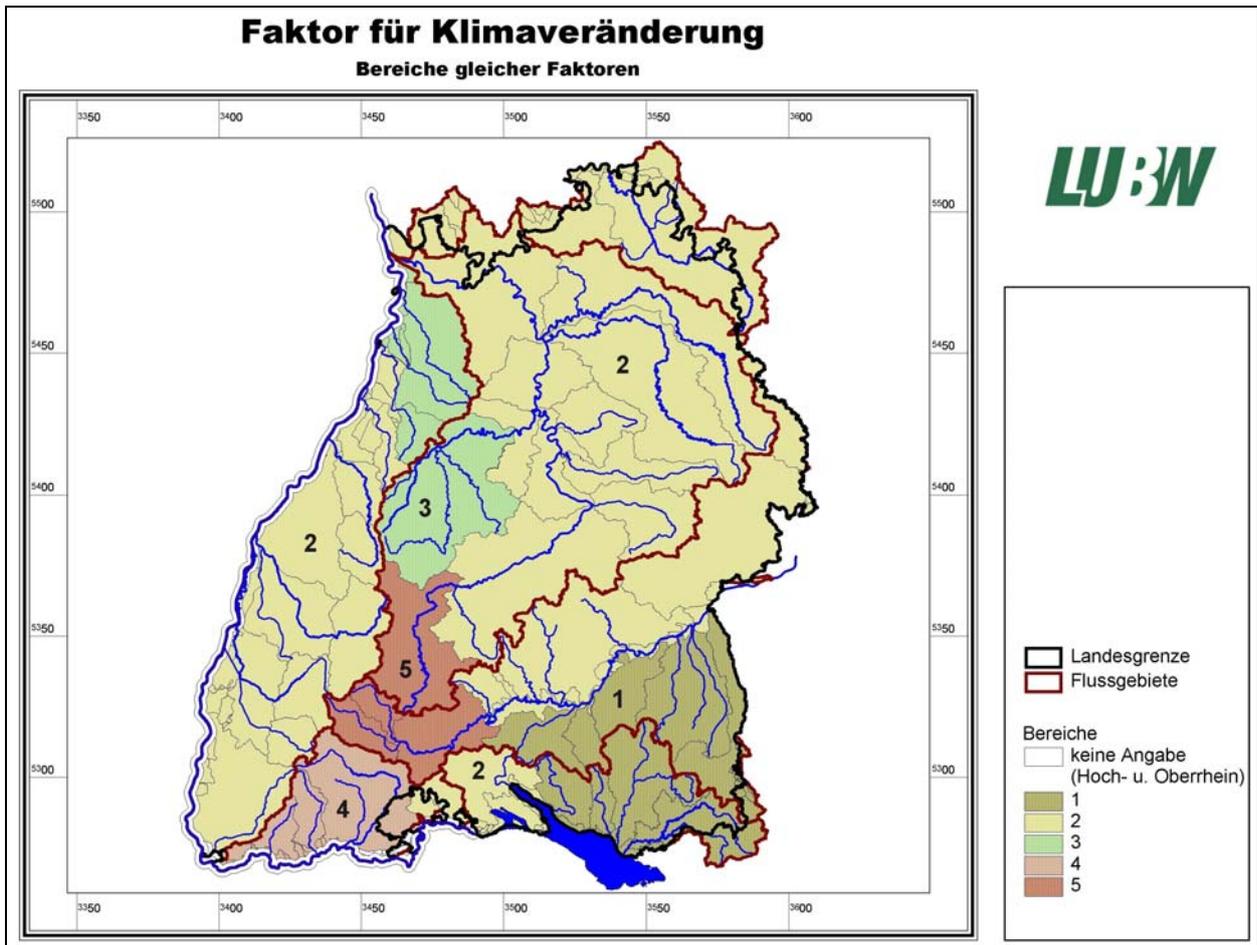


Bild 21: Regionen in Baden-Württemberg mit einheitlichen Klimaänderungsfaktoren

| T [Jahre] | Klimaänderungsfaktoren $f_{T,K}$ | | | | |
|--------------|----------------------------------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 2 | 1,25 | 1,50 | 1,75 | 1,50 | 1,75 |
| 5 | 1,24 | 1,45 | 1,65 | 1,45 | 1,67 |
| 10 | 1,23 | 1,40 | 1,55 | 1,43 | 1,60 |
| 20 | 1,21 | 1,33 | 1,42 | 1,40 | 1,50 |
| 50 | 1,18 | 1,23 | 1,25 | 1,31 | 1,35 |
| 100 | 1,15 | 1,15 | 1,15 | 1,25 | 1,25 |
| 200 | 1,12 | 1,08 | 1,07 | 1,18 | 1,15 |
| 500 | 1,06 | 1,03 | 1,00 | 1,08 | 1,05 |
| 1000 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

Bemerkung: Für Jährlichkeiten $T > 1000$ a ist der Faktor gleich 1,0

Bild 22: Regionale Klimaänderungsfaktoren für unterschiedliche Jährlichkeiten T