

**Das Klima von Gundersheim – Analyse nach 30 Jahren Messungen:
Kennzeichen, Besonderheiten und Veränderungen
(Rheinland-Pfalz, Landkreis Alzey-Worms)**

MARTIN WERNER & HANS-JOACHIM FUCHS

Kurzfassung

Die 30-jährige Klimastudie in Gundersheim (1995-2024) zeigt eine deutliche Erwärmung mit steigenden Durchschnittstemperaturen. Der wärmste Monat ist der Juli mit durchschnittlich 20,5 °C, während der kälteste Monat der Januar mit 1,9 °C ist. Die Zahl der heißen Tage (≥ 30 °C) hat sich in den letzten Jahrzehnten erhöht, während Frosttage abgenommen haben. Die jährlichen Niederschlagssummen schwanken stark zwischen 327 mm (2003) und 738 mm (2002). Aufgrund des Leeeffekts der umliegenden Mittelgebirge zählt Gundersheim zu den trockensten Regionen Deutschlands. Starke Tag-Nacht-Schwankungen treten besonders im Frühjahr und Herbst auf, während Sommernächte wärmer geworden sind. Die jährliche Niederschlagsintensität hat zugenommen, was zu häufigeren Starkregenereignissen führt. Die Korrelation zeigt, dass CO₂-Werte einen signifikanten Einfluss auf die Temperaturentwicklung haben. Sonnenfleckenzyklen beeinflussen das Klima nur geringfügig, während anthropogene Faktoren dominieren. Die Daten belegen einen Trend zu längeren Sommern, kürzeren Wintern und einer Verschiebung der Niederschläge.

Abstract

**The climate of Gundersheim – Analysis after 30 years of measurements:
Characteristics, peculiarities, and changes (Rhineland-Palatinate, Alzey-Worms district)**

The 30-year climate study in Gundersheim (1995-2024) shows significant warming with rising average temperatures. The warmest month is July with an average of 20.5 °C, while the coldest month is January with 1.9 °C. The number of hot days (≥ 30 °C) has increased in recent decades, while frost days have decreased. Annual precipitation varies significantly, ranging from 327 mm (2003) to 738 mm (2002). Due to the lee effect of the surrounding mountains, Gundersheim is one of the driest regions in Germany. Strong day-night temperature fluctuations occur in spring and autumn, while summer nights have become warmer. Annual precipitation intensity has increased, leading to more frequent heavy rain events. Correlation analysis shows that CO₂ levels significantly influence temperature development. Solar cycles have a minor effect on climate, while anthropogenic factors dominate. The data indicate a trend towards longer summers, shorter winters, and shifting precipitation patterns.

Key words

Climate change, Temperature development, Precipitation patterns, Extreme weather events, CO₂ concentration, Seasonal shift, Increase in droughts

1. Rheinhessen, eine Region voller geographischer Besonderheiten und Wechselwirkungen

Wer aus den Waldarealen des Donnersbergs, der dem westlichen Horizont Rheinhessens das orographische Gepräge gibt, seinen Blick östlich bis nördlich schweifen lässt, dem öffnet sich ein weiträumiges Landschaftsbild. Das Rhein Hessische Tafel- und Hügelland grenzt geographisch an das Nordpfälzer Bergland. Im südlichen Rheinhessen, auch als Wonnegau bezeichnet, liegt am östlichen Rand des Zeller Plateaus die kleine durch den Weinanbau geprägte Gemeinde Gundersheim mit 1.548 Einwohnern (Stand: 31.12.2023). Weiterführende regionalgeographische Aspekte sowie Auswertungen zu mikro- und mesoklimatischen Besonderheiten von Gundersheim wurden vom Autorenteam bereits in früheren Publikationen erörtert (FUCHS & WERNER 1995, 1996, 1997, 1998, 2002, 2014, 2019).

Wie nur wenige Landstriche in Deutschland, ist Rheinhessen im Hinblick auf die klimageographische Ausstattung sehr begünstigt, wodurch sich der Weinanbau gerade hier von alters her in so ausgedehntem Maße entwickeln und bis heute erhalten konnte. Trockenheit in der Reifephase, reicher Sonnenschein, Wärme bei langer Vegetationszeit und die guten tiefgründigen Böden sind die idealen Bedingungen für den intensiven Weinbau. Rheinhessen gesamt gesehen ist

daher nicht überraschend auch das größte zusammenhängende Weinanbaugebiet in Deutschland. Im Regenschatten der westlich und nordwestlich gelegenen Höhenzüge des Donnersbergs (Abb. 1), Ardennen, Eifel, Hunsrück und Nordpfälzer Bergland, ist die geographische und klimatische Lage außerordentlich günstig für Wein, Obst und Gemüsebau. Mit 180 bis 200 frostfreien Tagen ist die hohe durchschnittliche Jahrestemperatur in Mainz, Worms, Oppenheim und Alzey von 9,8 °C zu erklären. In der waldarmen Region erreicht die durchschnittliche Niederschlagssumme nur 510 mm mit jährlichen Schwankungen zwischen 450 mm und 590 mm. Für den Weinbau und die Erzielung von Spitzenweinen ist ausschlaggebend, dass lange, warme, trockene und sonnenreiche Herbste häufig vorkommen. Nicht ohne Grund wird diese Region gerne als „Toskana“ Deutschlands bezeichnet. Dazu kommen noch die günstigen edaphischen Bedingungen. Die rheinhessischen Böden, die geologisch zum Mainzer Becken gehören, wurden maßgeblich durch die letzte Kaltzeit geprägt. Es dominiert der feinsandige, zum Teil kalkhaltige Löss, der seine Ablagerung im Wesentlichen dem Wind verdankt.

Die Wasserhaltekapazität der Lössböden ist eine wichtige Voraussetzung für die große Fruchtbarkeit. Diese besondere klimageographische Ausprägung, bestehend aus der thermischen Begünstigung als auch der hygrisch reduzierten Regenmenge durch den Loeffekt bei vorherrschenden Winden aus westlichen



Abb. 1: Blick auf den Donnersberg (links), Blick auf Gundersheim (rechts). Fotos: Hubert WERNER.

Richtungen, machen diesen Landstrich für die vorliegende Studie so interessant. Vor diesem Hintergrund wurde eine Messkampagne am 1.1.1995 gestartet und erreichte am 31.12.2024 den Gesamtmesszeitraum von 30 Beobachtungsjahren.

Das laufende Klima-Projekt untersucht die allgemeinen Kennzeichen des vorherrschenden Klimas sowie Veränderungen innerhalb des 30-jährigen Messzeitraumes. Das Projekt wird wissenschaftlich betreut von Prof. Dr. Hans-Joachim FUCHS vom Geographischen Institut der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. Die Stationsleitung liegt bei Diplom-Geograph Martin WERNER.

2. Klimageographische Einordnung der Station Gundersheim

Im neuesten DIERCKE Weltatlas (2023) werden in einer Karte die Klimaregionen Deutschlands detailliert aufgeschlüsselt (Abb. 2). Darin erkennbar ist eine kleinräumige Zone östlich des Donnersbergs, die als klimaökologischer Leeschatten fungiert. Innerhalb dieser Zone sind höhere Temperaturen (mit zugleich den geringsten jährlichen Niederschlagssummen) erkennbar.

Die Niederschläge werden hierbei in sechs Klassen eingeteilt, die mit A beginnen und mit F abschließen, die thermische Einteilung ergibt sich als Nummer, bei 3 beginnend bis 7, es handelt sich hierbei um die Wachstumsmonate, gekennzeichnet durch eine Monatsmitteltemperatur von 10 °C oder mehr. Die mittlere jährliche Niederschlagssumme und jährliches Temperaturmittel werden durch die Kombination des Buchstabens und der Nummer gebildet. Sehr deutlich ausgeprägt ist die braune Zone im Nördlichen Oberrheingraben, südlich von Mainz. In diesem Bereich Deutschlands werden die höchsten Jahresmitteltemperaturen erreicht, hier liegen im Mittel 7 Monate des Jahres über 10 °C. Zugleich bewegen sich die Jahresniederschlagssummen bei unter 600 mm. Daraus ergibt sich die Kennzeichnung „A7“. Im Osten Deutschlands (Magdeburger Börde bzw. rund

um Berlin) werden nur 5 Monate mit Durchschnittstemperatur von über 10 °C erreicht, die Niederschläge dort liegen auch unter 600 mm Niederschlag pro Jahr; daraus ergibt sich die Kennzeichnung „A5“. Eine kleinräumige Zone im südlichen Rheinhessen befindet sich östlich des Donnersbergs, erkennbar als gepunktete Fläche und der Ausweisung als „A6“: es werden in diesem Bereich Niederschläge unter 600 mm im Jahresdurchschnitt erreicht, allerdings sind nur 6 Monate mit einer Mitteltemperatur von größer 10 °C ausgewiesen. Die thermische Gunst, verbunden mit einer reduzierten durchschnittlichen Niederschlagsmenge machen diesen Raum zu einer klimageographischen Besonderheit. Die 30-jährige Studie ergab, dass Gundersheim nicht zur Kategorie „A6“, sondern zur Kategorie „A7“ gehört. Diese ist deutschlandweit außer im Nördlichen Oberrheingraben noch im Stadtgebiet von Berlin zu finden, wo sie sich möglicherweise auf den städtischen Wärmeineffekt zurückführen lässt.

3. Klimadiagramm von Gundersheim

In der Reliefkarte von Rheinland-Pfalz ist Gundersheim, zwischen Alzey und Worms gelegen, mit einem roten Punkt und der Abkürzung „Gsh“ gekennzeichnet (Abb. 3). Erkennbar sind die nordwestlich und westlich von Gundersheim gelegenen Mittelgebirge Eifel, Hunsrück, Nordpfälzer Bergland mit dem Donnersberg als orographischer „Eckpfeiler“. Diese Mittelgebirgszüge fungieren an den Luvseiten als sog. „Regenfänger“: Die atlantischen Luftmassen, mit Feuchtigkeit reichlich beladen, regnen sich hier ab. Bei Erreichen des östlich/südöstlich gelegenen Oberrheingrabens sinken die Luftmassen ab, was zu deren Erwärmung und Wolkenauflösung führt, häufig sichtbar an föhnartigen Aufheiterungen am Himmel und sehr geringem Niederschlag. Diese orographische Mehrfachleelage ist sehr markant ausgeprägt.

Für die Erstellung eines Klimadiagramms mit den damit verbundenen Aussagen über

das Klima eines Ortes müssen viele Daten erfasst werden. Gemäß der Richtlinie der WMO (World Meteorological Organisation, Genf, Schweiz) muss mindestens eine 30-jährige Messreihe vorliegen (Standardperiode). Temperatur und Niederschlag wurden in Gundersheim über die letzten 30 Jahre gemessen. Die Temperatur wurde auf stündlicher Basis erfasst; für den Niederschlag wurde die tägliche Niederschlagssumme registriert. Die erfasste Datenmenge liegt bei über 273.750 Werten, die Monat für Monat aus den erfassenden Messgeräten ausgelesen und in MS Excel eingegeben wurden. In den Anfangszeiten wurden Thermo-Hygrographen nach THIES verwendet, ab 2002 erfolgte die Umstellung auf eine digitale Station namens Telemet, 2010 auf WS3600 und digitale Datenlogger.

Seit 2016 werden die meteorologischen Daten aus drei automatisch registrierenden Stationen des Typs WS 2816 gewonnen. Bei der WS 2816 des Herstellers Technoline handelt es sich um eine Wetterstation mit mehreren Sensoren, welche Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, Windgeschwindigkeit und -richtung sowie Niederschlagsmenge stündlich ermitteln und in einem internen Speicher ablegen. Diese Messwerte werden dann regelmäßig über die USB-Schnittstelle ausgelesen und in eine Wetterdatenbank gespeichert. Bei Gerätewechsel wurden nach Einsatz der neuen Apparaturen die herkömmlichen Messgeräte eine Zeit lang parallel weitergeführt und die Messwerte auf Homogenität geprüft. Es könnte zu Abweichungen durch den jeweiligen Gerätewechsel kommen. Dies war nicht

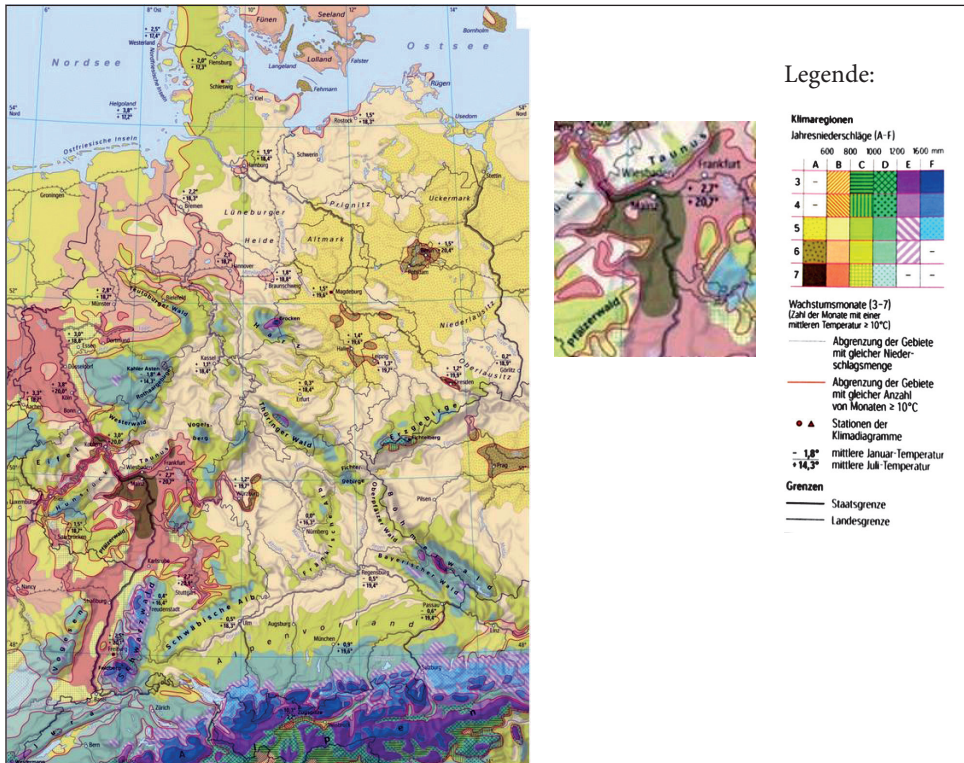


Abb. 2: Klimaregionen Deutschlands mit einem Detailausschnitt der Region um Gundersheim. Der Nördliche Oberrheingraben gehört zur Kategorie A7 mit durchschnittlichen Jahresniederschlägen unter 600 mm (A) und sieben Monaten mit Durchschnittstemperaturen über 10 °C (aus: Diercke Weltatlas, 2023).

der Fall. Der Standort der Station wurde nicht verlegt, und es gab auch keine sonstigen Veränderungen in der unmittelbaren Umgebung. Die stündlichen Daten der Klimaelemente Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Nieder-

schlag wurden in den Messgeräten gespeichert und regelmäßig monatlich ausgelesen. Aus den erfassten Stundendaten wurden Tagesdaten ermittelt, aus diesen wiederum Monats- und schließlich Jahresdaten generiert. Das erstellte Klimadiagramm von Gunders-

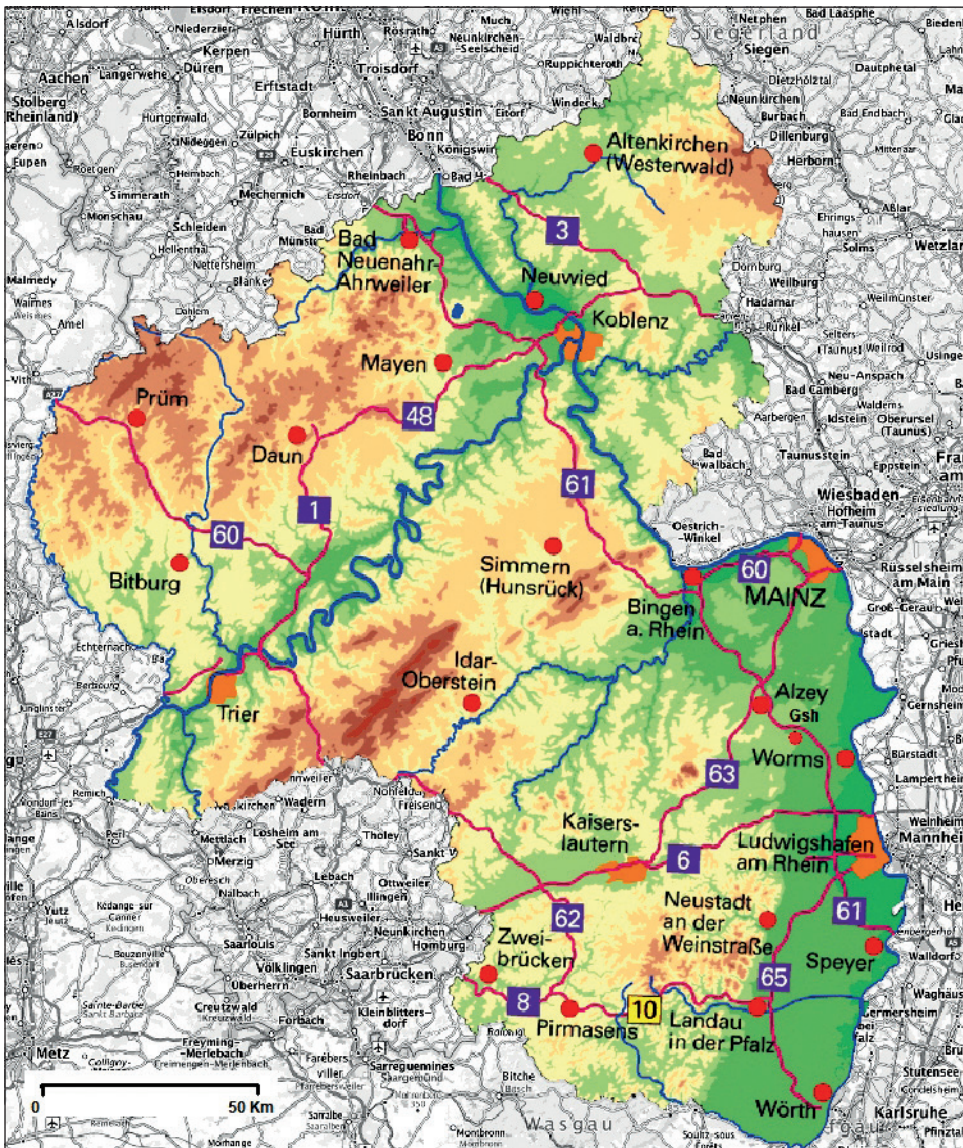


Abb. 3: Reliefkarte von Rheinland-Pfalz (links) mit Lage von Gundersheim (Gsh), Quelle: Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz, <https://maps.rlp.de/viewer/gelaende/#>.

heim (Abb. 4) ist an das Gestaltungsprinzip nach WALTER & LIETH angelehnt. Hierbei werden die monatlichen Temperatur- und Niederschlagswerte zusammen in einem Diagramm gezeigt. Die Niederschlagsmengen werden auf einer Skala im Verhältnis 2 : 1 zu den Temperaturwerten dargestellt. Liegen die Niederschlagssäulen im Diagramm höher als die Werte in der Temperaturkurve, handelt es sich um einen Ort, an dem die Niederschläge klimaökologisch als ausreichend feucht (humid) zu interpretieren sind. Liegen sie darunter, werden die jeweiligen Monate als trocken (arid) bezeichnet. Das Klimadiagramm wurde erstellt über den gesamten 30-jährigen Beobachtungszeitraum vom 1.1.1995 bis 31.12.2024. Darin ersichtlich ist der typische Charakter eines Cfb-Klimatyps (nach der Klimaklassifikation von KÖPPEN) mit warmen, feuchten Sommern und milden, mäßig humiden Wintermonaten. Der kälteste Monat ist der Januar mit 1,9 °C, der wärmste Monat der Juli mit 20,5 °C. Die durchschnittliche Jahresamplitude – die Spannweite zwischen

wärmstem und kältestem Monat – beträgt 18,6 K.

Der Monat mit der geringsten Niederschlagssumme ist der April mit einer mittleren Monatssumme von nur 31 mm. Der Monat mit der höchsten Niederschlagssumme ist der August mit 57 mm. Die mittlere jährliche Niederschlagssumme beträgt 519 mm und lässt sich als vergleichbar gering beurteilen. Die mittlere jährliche Niederschlagssumme beträgt für Deutschland in etwa 830 mm. Die Niederschläge verteilen sich aber regional sehr unterschiedlich. Typischerweise liegen die Stationen mit den geringsten Niederschlägen im mehr kontinental geprägten Klima im Osten Deutschlands, in Brandenburg rund um Berlin sowie östlich des Harzes. Im Westen Deutschlands stellt der Oberrheingraben eine Region dar, die von den geringsten Niederschlägen gekennzeichnet ist. Aufgrund der im Westen gelegenen Mittelgebirge Pfälzerwald, Hunsrück, Eifel, Ardennen regnen sich die aus Nordwesten und Westen kommenden Luftmassen ab, was zu deutlich reduzierten

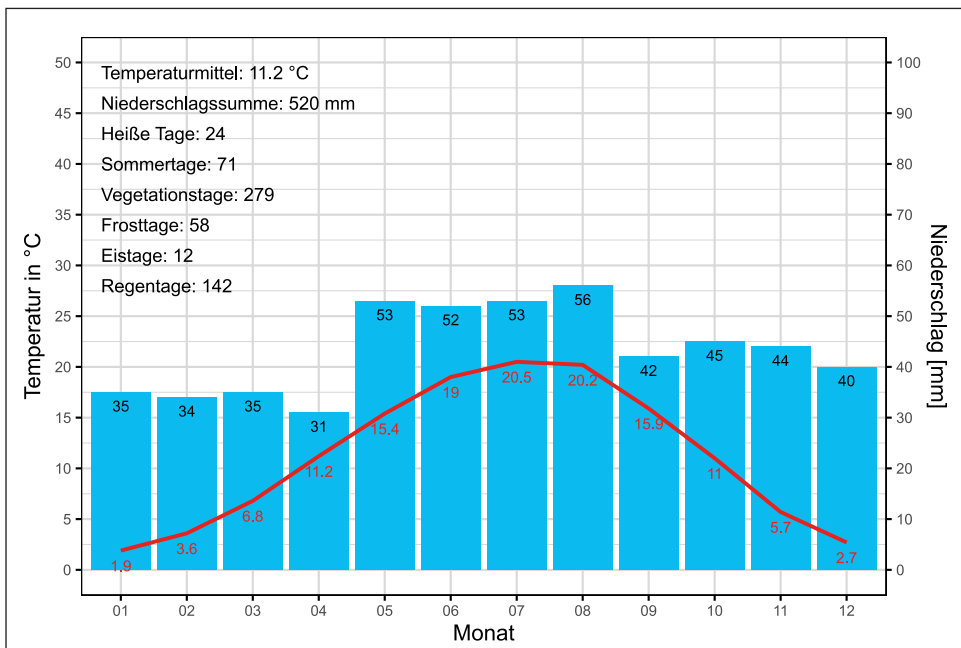


Abb. 4: Klimadiagramm von Gundersheim, 193 m ü. NHN (1995-2024) nach WALTER & LIETH.

Niederschlagsmengen östlich davon führt. Eine mesoklimatische Besonderheit stellt hierbei der Donnersberg dar: Im Nordpfälzer Bergland am Rand des Oberrheingrabens gelegen ist dieses markante Bergmassiv die letzte orographische Hürde für die aus Westen ankommenden Luftmassen.

Im Lee-Bereich kommt es häufig zum Absinken der Luftmassen mit ausgeprägter Wolkenauflösung, sichtbar an heiterem Wetter und typischen Altocumulus lenticularis (Föhn-) Wolken. Daraus ergeben sich eine höhere Sonnenscheindauer, geringere Niederschläge und erhöhte Temperaturen.

Gemäß dem Klimadiagramm sind im langjährigen Mittel 24 heiße Tage pro Jahr zu erwarten, 71 Sommertage, 279 Vegetationstage, 58 Frosttage und 12 Eistage. Durchschnittlich verzeichnet Gundersheim 141 Regentage im Jahr.

Ein Zeitreihenvergleich der Jahresmitteltemperaturen und -niederschläge wird in folgendem Diagramm dargestellt (Abb. 5). Es handelt sich um eine bedingte Formatierung in MS Excel. Es wurde die „Blau-Weiß-Rot-Farbskala“ gewählt, die einen guten Überblick über die gewählten Daten gibt. Es wird deutlich, wie kühlere Jahre mit wärmeren Jah-

ren abwechseln, insbesondere in den letzten Jahren haben wir es mit sehr warmen Jahren zu tun. Was die Niederschläge angeht, sind die Summen in den letzten 10 Jahren zunächst unterdurchschnittlich, dann wiederum etwas überdurchschnittlich. In der dritten kleineren Zeile wurde der Quotient errechnet aus der doppelten Mitteltemperatur und der Jahresniederschlagssumme. Der Quotient lässt einen direkten Vergleich der Jahre untereinander zu. Ist der Quotient sehr groß, bedeutet dies, dass es sehr hohe Temperaturen im Vergleich zur jährlichen Niederschlagssumme gab. Mit einem Wert von 3,4 stellt das Jahr 2017 für Gundersheim das wärmste und zugleich trockenste Jahr dar. Die Werte über 2,0 sind in den letzten 10 Jahren durchweg präsent, von daher lässt sich interpretieren, dass die Niederschläge im Verhältnis zu den erhöhten Temperaturen sehr niedrig ausfallen.

4. Auswertung der Niederschlagssummen und Temperaturdaten

Das folgende Niederschlagsdiagramm (Abb. 6) zeigt die monatlichen Niederschlagssummen für den Zeitraum von 1995 bis 2024 auf. Bei dem Diagramm handelt es sich um

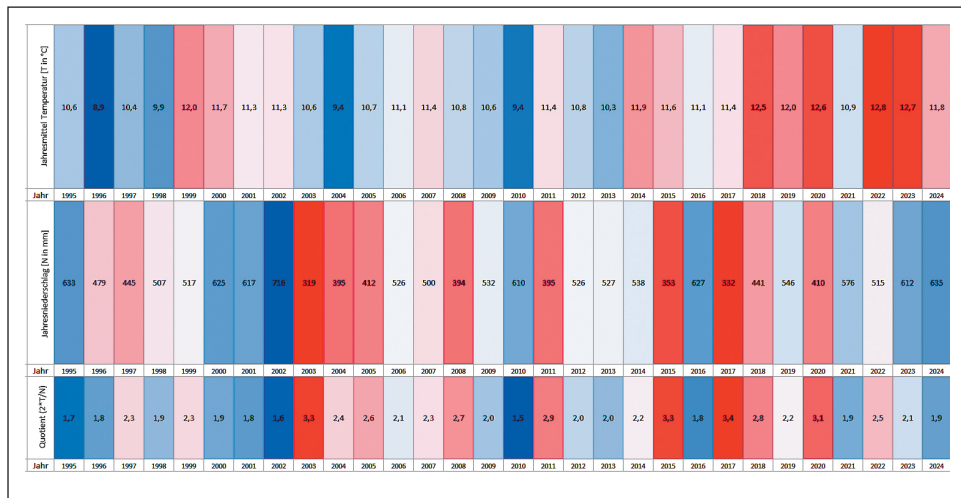


Abb. 5: Zeitreihenvergleich der Jahresmitteltemperaturen und -niederschläge für Gundersheim.

eine 2D Heatmap mit integrierten Isohyetenlinien. Eine Isohyete ist eine Linie auf einer Karte, die Punkte mit gleichem Niederschlag verbindet. Es wurde mit Plotly in Python erstellt und ist als interaktives Diagramm in die Projektwebseite (<https://www.klimastation-gundersheim.de/temp.htm>) eingebunden. Auf der x-Achse sind die Jahre von 1995 bis 2024 aufgetragen, auf der y-Achse von oben nach unten die Monate von Januar bis Dezember. Über das Diagramm kann für jeden Monat und jedes Jahr die gefallene Niederschlagsmenge ermittelt werden. Der kontinuierliche Wechsel der Farben von hellgelb (sehr trocken) über hellblau zu blau (feucht) vermittelt auf anschauliche Weise, wo es Jahre gab mit trockenen bzw. feuchten Monaten. Es wird ersichtlich, dass die Monate mit den höchsten Niederschlagssummen meist in den Sommermonaten zu finden sind. Es sind oft einzeln auftretende Starkregenereignisse in Form von Gewittern, die den Wert der monatlichen Niederschlagssumme bestimmen.

Im einzeln zu nennen sind die Monate August 2002, August 2006 sowie 2010 aber auch Juli 2014. Ferner auch der Juni (2018 / 2021). Schließlich auch der Mai 2024. In diesen Monaten wurden Niederschlagssummen von über 100 mm gemessen, weit über den langjährigen Monatsmitteln. Höhere Lufttemperaturen führen dabei zu einer gesteigerten Aufnahme von Wasserdampf in der Atmosphäre. Bei starker Konvektion der Luftmassen durch hohe Sonneneinstrahlung bei sommerlicher Hitze entstehen letztlich Starkregen. Selbst der Monat Mai ist davon bereits betroffen.

Der Tag mit der höchsten Tagesniederschlagssumme in Gundersheim war der 27. August 2002. An diesem Tag gab es ein Gewitter, das sich in den Nachmittagsstunden bildete und gegen 18 Uhr zu sintflutartigen Niederschlägen führte. In nur einer Stunde wurden 83,1 mm Niederschlag gemessen. Es kam im ganzen Ortsgebiet zu Überschwemmungen, zahlreiche Keller mussten von der Feuerwehr

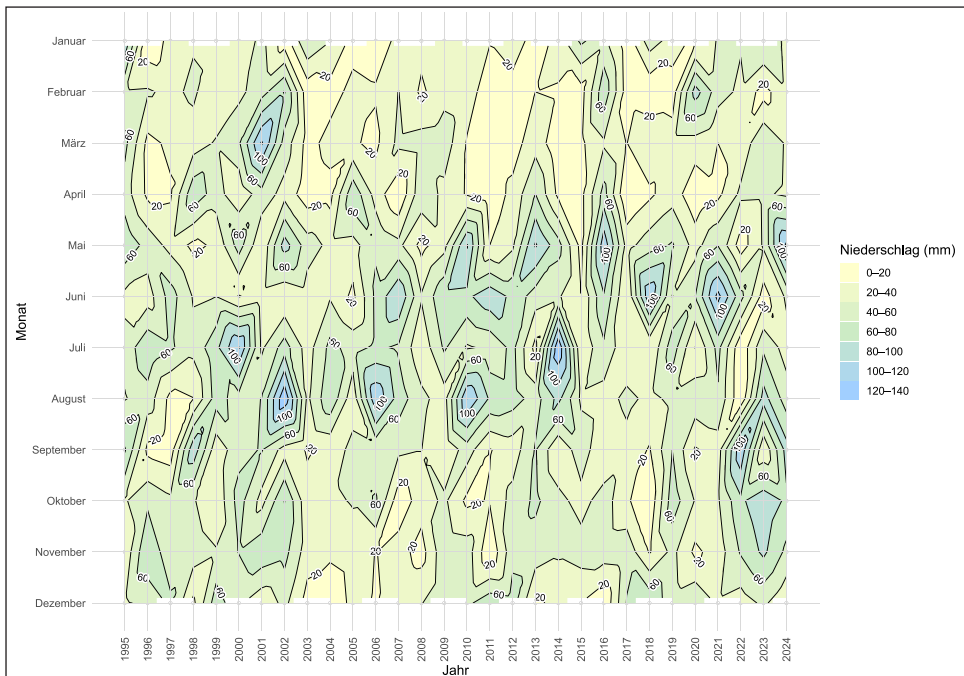


Abb. 6: Monatliche Niederschlagssummen für den Zeitraum von 1995-2024 in Gundersheim.

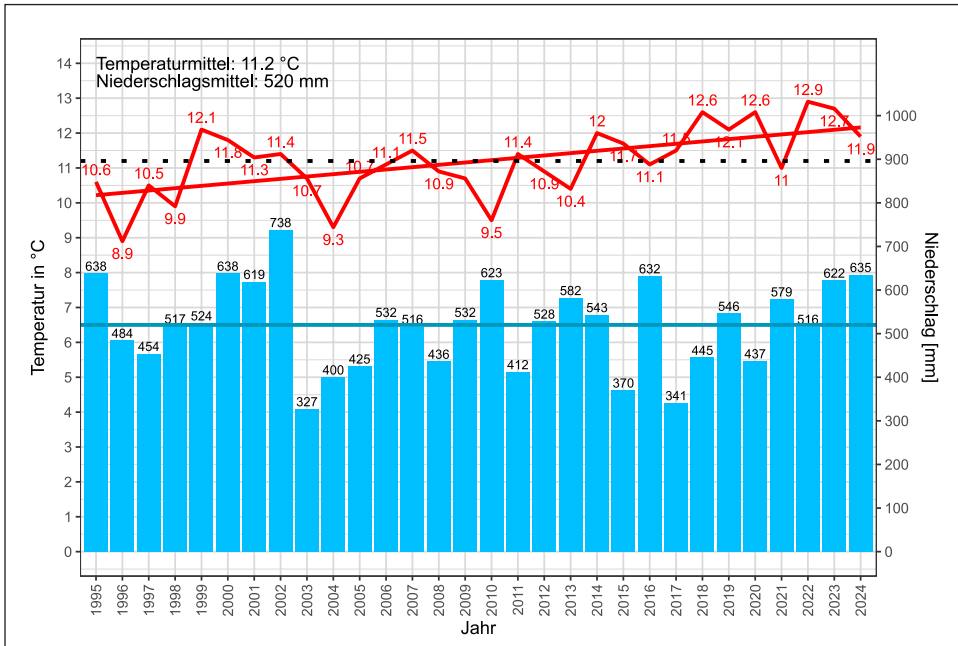


Abb. 7: Jahresmitteltemperaturen und Niederschlagssummen in Gundersheim (1995-2024).

ausgepumpt werden. Ein Vergleich mit der nächstgelegenen Station des DLR, Kettenheim, zeigt, dass es dort nur 1,0 mm Niederschlag gab. Die Gewitterzelle hatte sich direkt über Gundersheim abgeregnet. Die Jahresmitteltemperaturen und -niederschlagssum-

men für den Zeitraum 1995 bis 2024 (Abb. 7) zeigen für beide Klimaelemente ausgeprägte interannuelle Schwankungen. Die Jahrestemperaturen schwanken zwischen 8,9 °C im Jahr 1996 und 12,9 °C im Jahr 2022. Insgesamt gesehen zeigen die Temperaturen einen leicht

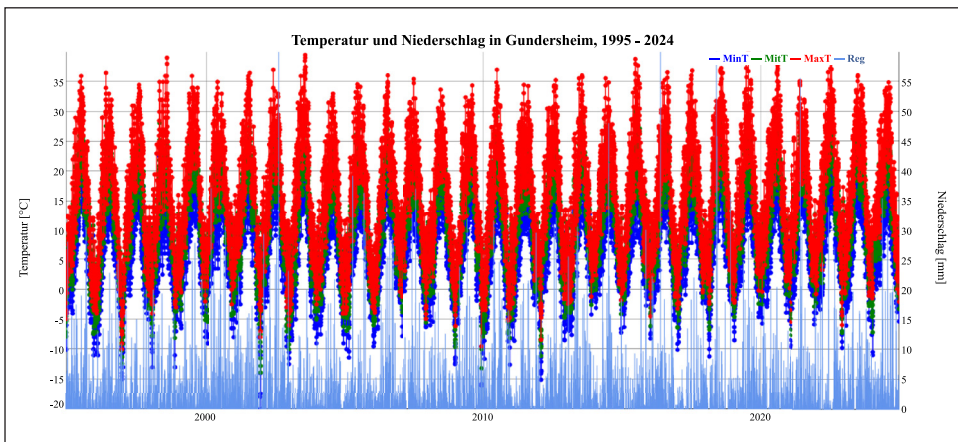


Abb. 8: Temperatur und Niederschlag in Gundersheim, Tageswerte vom 1.1.1995 bis 31.12.2024.

ansteigenden Trend: Während zu Beginn des Beobachtungszeitraums die Temperaturen zwischen 10 und 11 °C lagen, ergeben sich für das Ende eher Temperaturen um die 12 °C.

Die Jahresniederschlagssummen schwanken sehr deutlich von Jahr zu Jahr: die geringste Jahresniederschlagsmenge wurde im Jahr 2003 mit 327 mm ermittelt (das war der sog. Jahrhundertssommer in Mitteleuropa mit gravierenden Auswirkungen; viele Menschen starben aufgrund der großen Hitze), die höchste Jahresniederschlagssumme wurde ein Jahr zuvor, 2002, mit 738 mm verzeichnet. Dies zeigt, wie dicht Extreme aufeinander folgen können.

Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt einen Dygraph einer Timeseries-Darstellung für Temperatur und Niederschlag in Gunders-

heim des Zeitraums 1995 bis 2024 wie er in RStudio als Interface zu JavaScript entworfen wurde. Dargestellt sind die Tagestemperaturen (Minimum, Mittel, Maximum) sowie die Tagesniederschlagssummen. Bei dieser Grafik handelt es sich um eine interaktive Grafik, die ebenfalls auf der Projekt-Homepage (<https://www.klimastation-gundersheim.de/temp.htm>) einsehbar ist. In der Grafik kann gezoomt werden, um Daten eines einzelnen Tages oder eines beliebigen Zeitraumes zu ermitteln.

Wird diese Grafik etwas genauer betrachtet, fallen einige Rekorde auf, die in dem 30-jährigen Zeitraum in Gundersheim auftraten (Tab. 1).

Tabelle 1: Wetterrekorde in Gundersheim im Zeitraum 1995 bis 2024.

Titel	Wert	Datum
Heißester Tag	40,6 °C	25.07.2019
Kältester Tag	-20,0 °C	04.01.2002
Höchster Tagesniederschlag	83,1 mm	27.08.2002
Niedrigstes Tagesmittel der Temperatur	-13,9 °C	04.01.2002
Höchstes Tagesmittel der Temperatur	32,3 °C	25.07.2019
Höchstes Temperaturminimum	24,4 °C	26.07.2019

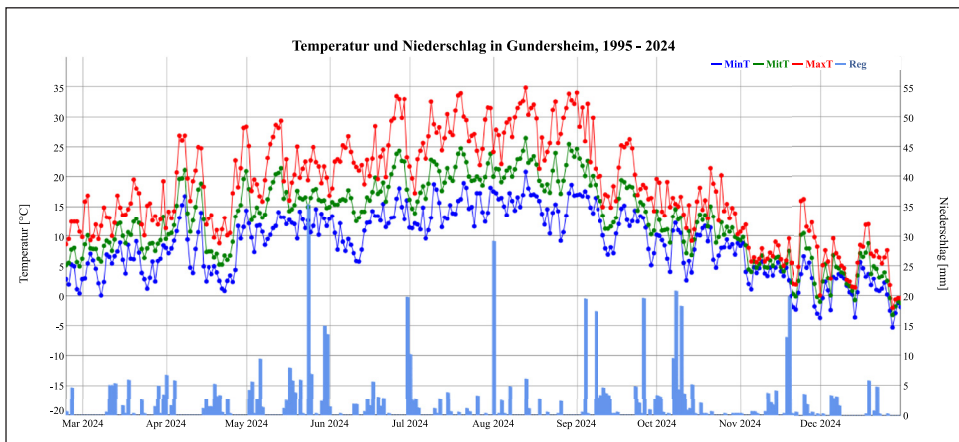


Abb. 9: Temperatur und Niederschlag in Gundersheim von März bis Dezember 2024.

Der 25.07.2019 war mit 40,6 °C der heißeste Tag des 30-jährigen Beobachtungszeitraums. Das äußerst hohe Tagesmittel der Temperatur von 32,3 °C bedeutet, dass es in den Abend- und Nachtstunden dieses Tages kaum abkühlte, so dass das Minimum am Morgen des Folgetags mit 24,4 °C sehr hoch lag. Es war dies die Nacht mit den höchsten Temperaturen des gesamten Beobachtungszeitraums.

Abb. 9 fokussiert auf die Daten des Jahres 2024. Die rote Linie stellt das Tagesmaximum der Temperatur dar, der Mauszeiger wurde auf die höchste Temperatur des Jahres 2024 gesetzt. Rechts oben in der Grafik werden als Tooltip die Werte für den Tag angezeigt. Am 13. August erreichte die Temperatur 34,9 °C. Das Tagesmittel bewegte sich an diesem Tag bei 26,5 °C. Das Tagesminimum von 20,9 °C

an diesem Tag weist auf eine Tropennacht hin; in solchen Nächten wird die 20-Grad-Schwelle nicht unterschritten, was sehr belastend für die Schlafqualität ist. An diesem heißen Tag gab es ein Gewitter: es wurde ein Niederschlag von 6,2 mm registriert.

Über das Zoom eines Jahres kann auch schnell ersehen werden, an welchen Tagen sehr hohe Niederschläge erreicht wurden. Für das Jahr 2024 waren das insbesondere die Tage: 24.05. (35,4 mm) und 1.08. (29,1 mm), um nur zwei Starkniederschlagsereignisse zu erwähnen. Auf diese Weise kann sich der Betrachter über die Temperaturen und Niederschläge eines jeden Tages im 30-jährigen Untersuchungszeitraum informieren. In der Grafik wird deutlich, wie stark die Spanne zwischen Minimum und

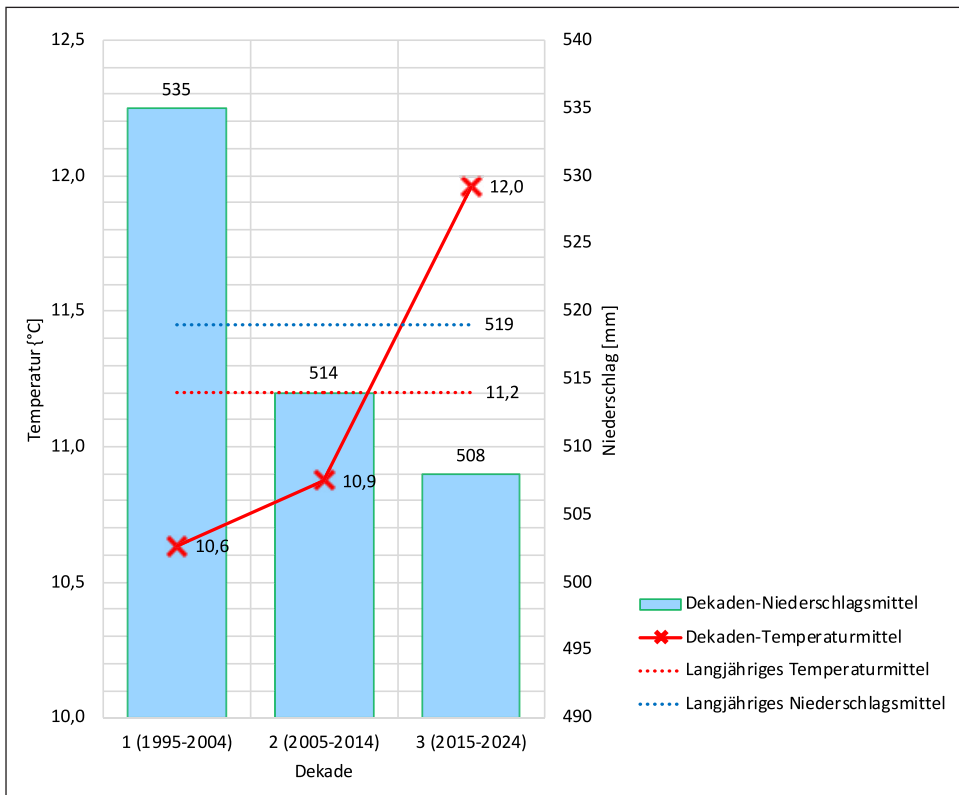


Abb. 10: Vergleich der Dekaden zu den langjährigen Mittelwerten von Temperatur und Niederschlag in Gundersheim für den Beobachtungszeitraum 1995-2024.

Maximum, besonders in den Sommermonaten, auseinanderliegt, in den Wintermonaten hingegen ist die Differenz zwischen Maximum und Minimum nicht so groß.

5. Betrachtung und Analyse der einzelnen Dekaden im Beobachtungszeitraum 1995-2024

Die drei Dekaden des 30-jährigen Beobachtungszeitraums unterscheiden sich teils sehr beträchtlich voneinander (Abb. 10). Für den gesamten Zeitraum ergibt sich für die Temperatur ein langjähriges Jahresmittel von 11,2 °C. In der ersten Dekade (1995-2004) wurde eine Mitteltemperatur von 10,6 °C ermittelt, für die 2. Dekade (2005-2014) ein Mittel von 10,9 °C und für die dritte Dekade (2015-2024) eine Mitteltemperatur von 12,0 °C. Es zeigt sich insbesondere das sehr deutliche Ansteigen in der 3. Dekade 2015-2024.

Die Niederschläge lagen in der 1. Dekade bei 535 mm, in der 2. Dekade bei 514 mm und in

der 3. Dekade bei 508 mm. Die Niederschläge haben im 30-jährigen Beobachtungszeitraum bei der Betrachtung von drei Dekaden abgenommen.

Die Daten wurden für eine detaillierte Analyse weiter aufgeteilt (Abb. 11). Die Dekaden auf Monatsbasis zeigen deutliche Unterschiede hinsichtlich Temperatur und Niederschlag. Ein durchschnittlicher Jahresverlauf der ersten Dekade (1995-2004) weist insbesondere im Juni das niedrigste Mittel auf, ebenso in den Wintermonaten November, Dezember und Januar. Die mittlere Jahresniederschlagssumme von 535 mm verteilt sich besonders auf die erste Jahreshälfte, Spitzenreiter ist der März mit einer Menge von 45 mm. Die zweite Dekade (2005-2014) weist die Niederschlagspitzen insbesondere im Juni und August auf, dafür sind die Niederschläge in Frühling und Herbst – im Vergleich zu den anderen Dekaden – stark reduziert. Auffällig ist die dritte Dekade (2015-2024): hier zeigen sich durch das ganze Jahr hinweg die höchsten Monatstemperaturen. Die Niederschläge sind, im

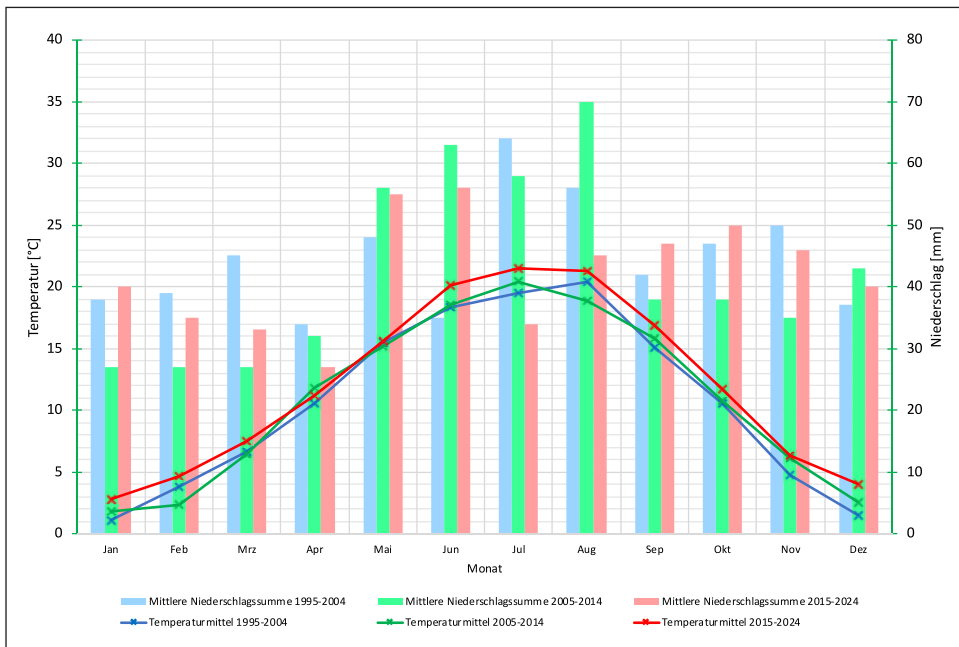


Abb. 11: Vergleich der Temperaturmittel und Niederschlagssummen in Gundersheim nach Dekaden.

Vergleich zu den anderen Dekaden, im Winterhalbjahr erhöht, während die Sommermonate mit reduzierten Mengen einhergehen. Es lässt die Interpretation zu, dass sich die Temperaturen für alle Monate in den 30 Jahren erhöht haben, zugleich haben sich die Niederschlagsmengen von höheren Niederschlägen im Sommer auf die Wintermonate verlagert. Interessant erscheint in diesem Hinblick der Monat Juli: in der 3. Dekade liegt die Niederschlagssäule deutlich niedriger als das Monatsmittel der Temperatur, was auf aride Verhältnisse (nach WALTER & LIETH) schließen lässt, in welchem sich die Niederschlagssumme unter der Temperaturkurve zeigt. Eine schwache Aridität weist auch der Juni in der 1. Dekade aus, denn die Niederschlagssäule im Diagramm liegt niedriger als das Monats-

mittel der Temperatur. Auch der April kommt in der dritten Dekade der Aridität recht nahe: die Niederschlagssumme beträgt 27 mm, die Temperatur 11,2 °C.

Das Thermoisoplethendiagramm von Gundersheim nach Carl TROLL (1943) (Abb. 12) zeigt den tageszeitlichen Verlauf der Temperatur für den Zeitraum von 1995 bis 2024. Der Begriff „Thermoisoplethe“ bedeutet Linie gleicher Temperatur. Somit sind in einem solchen Diagramm nur Temperaturwerte dargestellt. Im Gegensatz zum klassischen Klimadiagramm wird in diesem nicht nur der Jahresverlauf, sondern auch der Tagesverlauf der Temperatur gleichzeitig dargestellt. Die Datengrundlage sind 24 Stundenwerte (30-jähriges Mittel) für jeden der 12 Monate im Jahresverlauf, also 288 Mittelwerte der

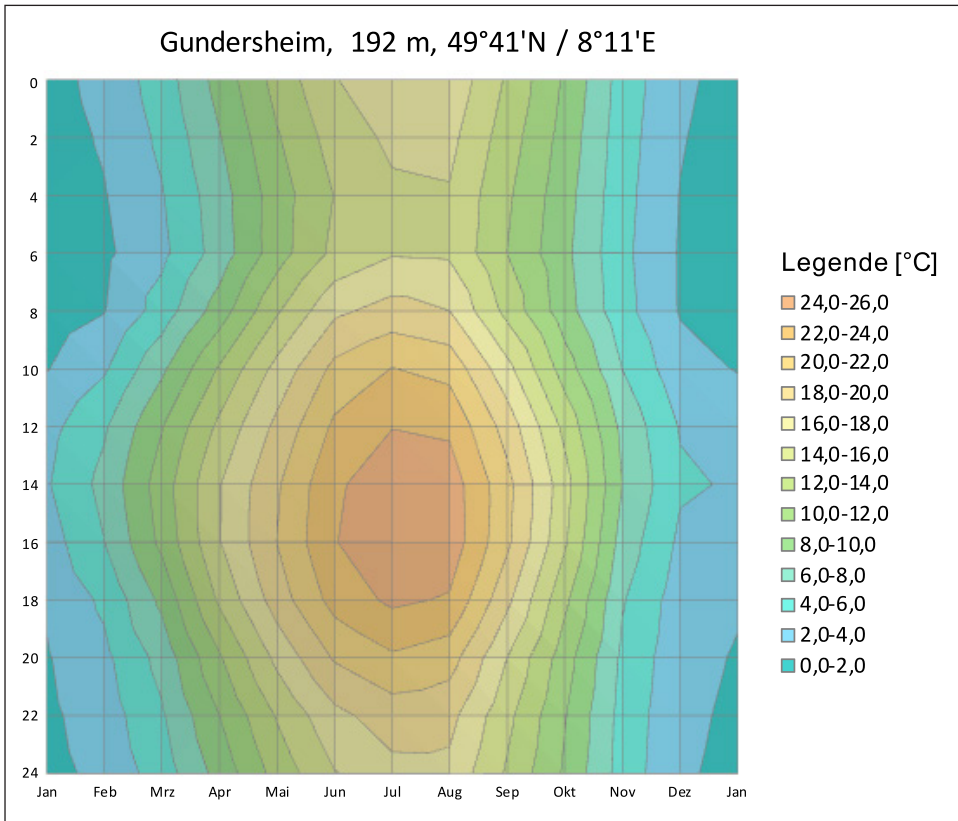


Abb. 12: Thermoisoplethendiagramm von Gundersheim, 193 m ü. NHN, 49°41'N / 8°11'E.

30-jährigen Beobachtungsreihe. Thermoisoplethendiagramme finden aktuell eine große Beachtung in der Klimaforschung, da man daran sehr genau die intraannuelle Variation (Veränderung/Verschiebung der Jahreszeiten) und somit den Gesamt-Klimacharakter erkennen kann. Vergleicht man unterschiedliche Standardperioden oder Dekaden miteinander, können dadurch sehr genau die tages- und jahreszeitlichen Veränderungen des Klimas erkannt und analysiert werden.

Aus einem Thermoisoplethendiagramm können die Tagestemperaturen für jeden Monat ermittelt werden. So wird im langjährigen Mittel die tiefste Temperatur im Januar erreicht, und zwar um 6 Uhr morgens mit 0,8 °C. Die höchste Temperatur hingegen wird im Juli erreicht, um 16 Uhr beträgt dann die Temperatur 25,4 °C. Die tiefsten Temperaturen werden kurz nach Sonnenaufgang erreicht – solange die Einstrahlung die Ausstrahlung noch nicht überwiegt. Die Temperaturmaxima werden in den Wintermonaten schon um 14 Uhr erreicht. Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass in den Wintermonaten der Tagesgang der Temperatur sehr gering, in den Sommermonaten hingegen sehr stark ausgeprägt ist. Man unterscheidet Tages- und Jahreszeitenklima. Im Fall von Gundersheim sind die Temperaturschwankungen über das Jahr stärker im Vergleich

zu den Tagesschwankungen; man spricht dann vom sog. Jahreszeitenklima. Dies wird besonders gut ersichtlich an den vertikal verlaufenden Isoplethen. Verlaufen hingegen die Linien überwiegend waagrecht, dann handelt es sich um einen Ort mit ausgeprägtem Tagesgang der Temperatur, was sehr typisch für tropische Standorte ist.

In Abb. 13 sind die drei Dekaden der 30-jährigen Beobachtungsreihe in Form von Thermoisoplethendiagrammen nebeneinander dargestellt. Gemeinsam in allen drei Dekaden ist das frühmorgendliche Minimum. Dieses wird in den Wintermonaten gegen 8 Uhr erreicht, in den Sommermonaten schon um 5 Uhr. Kurz vor Sonnenaufgang ist die Ausstrahlung am größten, hier wird im Mittel die tiefste Tagestemperatur erreicht. Wegen den früheren Sonnenaufgängen in den Sommermonaten ist das Minimum nach vorn verschoben. Die Tageshöchsttemperaturen fallen stets in die Nachmittagsstunden, etwa zweieinhalb Stunden nach dem Sonnenhöchststand. Auf 8° östlicher Länge überschreitet die Sonne erst gegen 12:28 Uhr den Meridian, es dauert bis 15 Uhr, bis die höchsten Temperaturen (erkennbar an der roten Wärmeinsel) erreicht werden. Es fällt auf, dass die dritte Dekade wesentlich höhere Temperaturen aufweist als die beiden vorhergehenden. Betrugen die

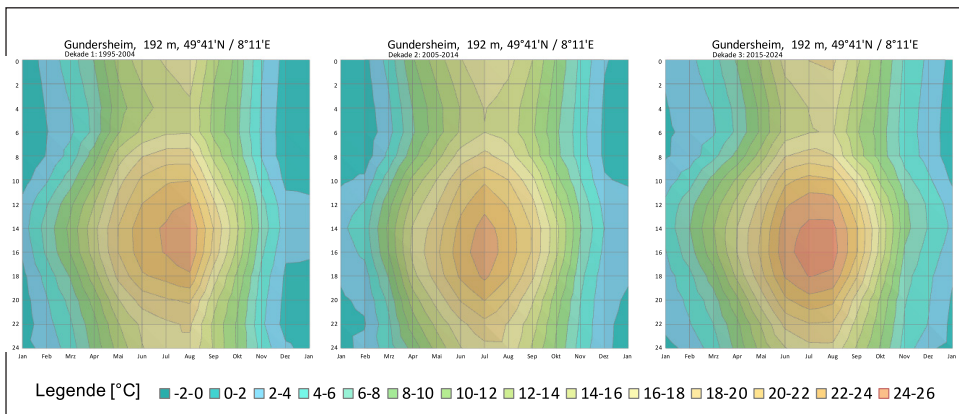


Abb. 13: Thermoisoplethendiagramme der drei Dekaden. Links: Dekade 1 (1995-2004), Mitte: Dekade 2 (2005-2014), Rechts: Dekade 3 (2015-2024).

Höchstwerte in den Nachmittagsstunden 14-16 Uhr 25 °C, so sind die Maxima in der 3. Dekade auf 27 °C angewachsen. Auch halten die Temperaturen bis in die Nachtstunden länger an, was auf eine erhöhte Anzahl von Tropennächten (eine Nacht, in der die Temperatur nicht unter 20 °C sinkt) schließen lässt; die „Wärmebrücke“ in die Nacht hinein vollzieht sich bei Temperaturen um die 14 °C, sichtbar an der Öffnung der 14°-Isoplethe. Auch die winterlichen Temperaturen erfahren mehr „Dynamik“ in der 3. Dekade: Wurden in den beiden ersten Dekaden lediglich ein oder zwei Temperaturkategorien durchlaufen, sind es in der 3. Dekade bereits drei Temperaturklassen (von 0-6 °C). Dies lässt auf einen ausgeprägteren Tagesgang schließen. Der Trend hin zu höheren Temperaturen, insbesondere in den Winter- und Sommermonaten, ist ersichtlich und wird vermutlich in der Zukunft weiter zunehmen.

Es lässt sich festhalten, dass es in allen Monaten über die drei Dekaden hinweg einen klaren Erwärmungstrend gibt. Die Durchschnittstemperaturen in allen Jahreszeiten sind gestiegen, insbesondere in den Sommermonaten. Die Temperaturen haben sich in den Wintermonaten um bis zu 2 K erhöht. Die Nächte werden insgesamt wärmer. Der stärkste Temperaturanstieg ist in den Sommermonaten am Nachmittag zu verzeichnen mit bis

zu 3 K höheren Spitzenwerten. In den Abendstunden gibt es ein langsames Abkühlen in den letzten Jahren, insbesondere in den Sommermonaten. Die Durchschnittstemperaturen steigen in den Frühlingsmonaten schneller als in anderen Jahreszeiten. Im März gibt es einen starken Anstieg der Tagestemperaturen von 9,0 °C (1995-2004) bis 11,8°C (2015-2024). Der Monat Mai hat heute Temperaturen, die früher erst im Juni erreicht wurden. Was den Sommer betrifft, werden die Hitzeperioden länger und intensiver. Der Juli und August weisen höhere Tageshöchsttemperaturen auf, mit einigen Werten über 27 °C. Der Herbstmonat September zeigt mit +2,7 K Erwärmung die stärkste Veränderung. Der November bleibt eher stabil, aber die Nachttemperaturen sind gestiegen. Was den Winter angeht, gibt es weniger Frosttage, mildere Nächte. Und der Februar hat sich um fast 2 K erwärmt. Wärmere Winter bedeuten weniger Frosttage, was sich auf Landwirtschaft und Natur auswirkt. Hitzewellen im Sommer könnten häufiger auftreten, mit möglichen negativen Auswirkungen auf die Wasserversorgung und Vegetation. Der Frühling beginnt früher, der Sommer verlängert sich, der Winter ist kürzer und milder. Insgesamt zeigt sich eine kontinuierliche Erwärmung von ca. 2-3 K über 30 Jahre, mit den größten Veränderungen in den Sommer- und Frühlingsmonaten.

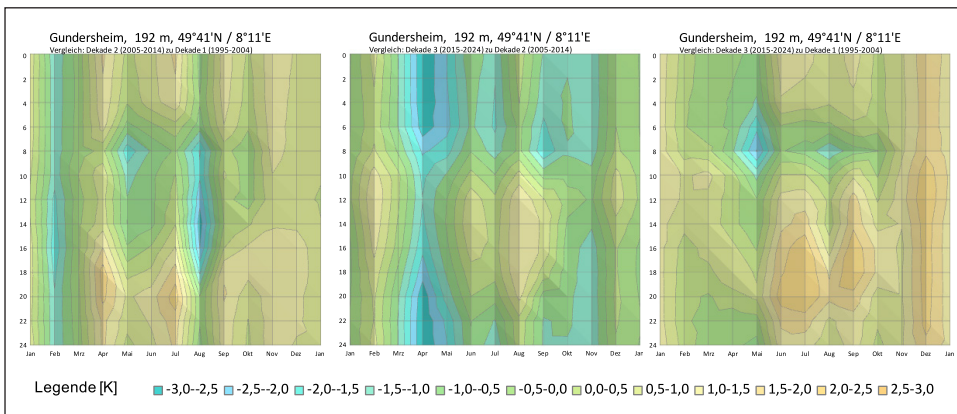


Abb. 14: Thermoisoplethendiagramme der drei Dekaden. Darstellung der absoluten Abweichungen zu den Langzeitmittelwerten. Links: Dekade 1 (1995-2004), Mitte: Dekade 2 (2005-2014), Rechts: Dekade 3 (2015-2024).

Die folgende Abbildung (Abb. 14) zeigt die Isoplethendiagramme der einzelnen Dekaden im Vergleich zueinander in Form von den absoluten Abweichungen auf. Temperaturdifferenzen werden in der Meteorologie in Kelvin (K) angegeben. Die erste Abbildung links zeigt den Vergleich von Dekade 2 (2005-2014) im Vergleich zur Dekade 1 (1995-2004): Es fällt auf, dass Februar und August kühler ausfallen (-2 bis -3 K), die Monate April und Juli sind von höheren Temperaturen, insbesondere in den Abendstunden zwischen 18 und 21 Uhr, gekennzeichnet (+3 K). Im Mai fallen die Temperaturen insbesondere in den Morgenstunden (7-10 Uhr) kühler aus.

Der Vergleich der Dekade 3 (2015-2024) zur Dekade 2 (Mitte) zeigt in den Sommer- und Wintermonaten positive Abweichungen bis hin zu 3 K, während die Frühlingsmonate, insbesondere der April, negative Abweichungen (-2 K) verzeichnen. Die negativen Abweichungen im Frühling können Hinweise auf Spätfröste sein, welche in der Landwirtschaft, besonders im Obst- und Weinanbau

für beträchtliche Ernteausfälle sorgen können. Die Sommermonate Juli und August verzeichnen deutliche Temperaturanstiege. Wird die 3. Dekade mit der 1. Dekade verglichen (rechts), werden die positiven Abweichungen in den Wintermonaten Dezember, Januar und Februar besonders deutlich: hier betragen die Abweichungen bereits 3 K. Auffallend sind auch die Wärmeinseln in den Sommer- und Herbstmonaten in den Abendstunden, wo die positiven Temperaturabweichungen bereits +3 K und mehr betragen. Vorsichtig interpretiert besteht eine Neigung hin zu wärmeren Sommer-, Herbst- und Wintermonaten, mit leicht negativen Tendenzen hin zu kühleren Frühlingsmonaten. Die allgemeine Tendenz zeigt eine signifikante Erwärmung, vor allem in den Wintermonaten. Die Sommermonate sind ebenfalls wärmer geworden, jedoch mit unterschiedlichen Mustern. Einige Monate (z. B. April) zeigen stellenweise Abkühlung. Die allgemeine Erwärmung spricht stark für einen Einfluss der globalen Erwärmung.

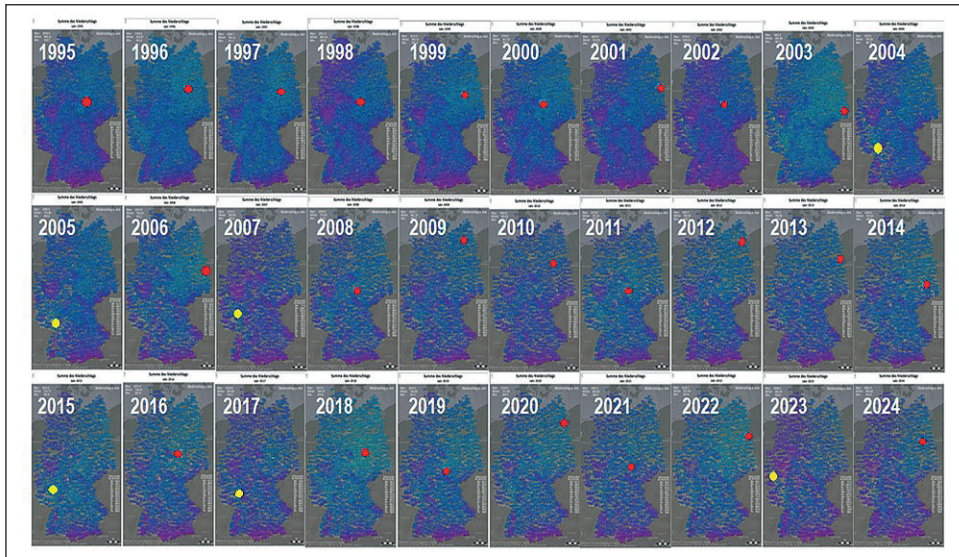


Abb. 15: Jahresniederschlagssummen in Deutschland, 1995-2024. Roter Punkt: Station des niedrigsten Jahresniederschlags (Ostdeutschland). Gelber Punkt: Station des geringsten Jahresniederschlags (Oberheingraben). Quelle: Deutscher Wetterdienst.

6. Gundersheim im Vergleich mit anderen trockenen Stationen in Deutschland

Auf der Webseite <https://www.mtwetter.de/monatskarte.php> sind die Jahresniederschlagssummen aus ganz Deutschland, basierend auf Daten des Deutschen Wetterdienstes, ersichtlich. Aufgelistet sind in der Grafik die Stationen mit der jeweils geringsten Jahresniederschlagssumme, erkennbar als rote Punkte (Abb. 15). Die Grafik zeigt, dass in 25 von 30 Jahren stets Stationen in den östlichen Bundesländern die niedrigsten Jahresniederschlagssummen aufwiesen. In fünf Jahren hingegen waren die Niederschlagssummen im Oberrheingraben am geringsten: Es waren dies die Jahre 2004, 2005, 2007, 2015 und 2023 (gelbe Punkte).

Bei den trockensten Stationen Deutschlands (Abb. 16) zeigt sich, dass in den Fällen der Jahre, in denen die trockensten Stationen im Oberrheintal liegen, Gundersheim nicht der trockenste Ort ist. Im Jahr 2004 lag Frankenthal mit 388 mm Jahresniederschlag unter der Menge von Gundersheim (400 mm), im Jahr 2005 war es Bad Dürkheim mit 394 mm, 2007 Geisenheim nahe dem Mittelrheintal mit 510 mm und 2015 Ingelheim mit 345 mm. Im Jahr 2017 hingegen war Gundersheim der trockenste Ort Deutschlands mit einer Jahresmenge von 341 Liter pro Quadratmeter. Die vom Deutschen Wetterdienst identifizierte trockenste Station war Dessau-Roßlau-Rodleben in Sachsen-Anhalt mit 417 mm.

Auf der Internetseite des Deutschen Wetterdienstes https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/nieder_8110_akt_html.html?view=naPublicati&nn=16102 werden die vieljährigen Mittelwerte der Jahre 1981-2010 aufgelistet. Enthalten sind 876 Stationen des Deutschen Wetterdienstes. Wird die Datenliste gefiltert nach der geringsten Niederschlagsmenge pro Jahr, so ist Grünow (im Landkreis Uckermark, Brandenburg) der Ort in Deutschland, der in diesem Zeitraum die geringste mittlere Jahresniederschlagsmenge empfangen hat. Es sind dies 483 mm Niederschlag. Der erste Ort mit der geringsten Niederschlagssumme, der sich

in der Oberrheinischen Tiefebene wiederfindet, ist Dannstadt-Schauernheim in Rheinland-Pfalz. Mit nur 542 mm Jahresniederschlag im Mittel von 1981-2010 handelt es sich um den trockensten Ort im Gebiet des Oberrheingrabens.

7. Gundersheim im mesoklimatischen Vergleich

Unter Mesoklima versteht man den Bereich, der zwischen Mikroklima und dem Makroklima liegt. Bislang wurde Gundersheim im großskaligen Umfeld betrachtet. Mit dem Aspekt des Mesoklimas werden ebenfalls regionale Unterschiede thermischer wie hygrischer Art sichtbar. Hierzu wurden in näherer Umgebung Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sowie des Dienstleistungszentrums Ländlicher Raum (DLR) Rheinhessen-Nahe-Hunsrück herangezogen.

Der GeoBox-Viewer der Dienstleistungszentren Ländlicher Raum in Rheinland-Pfalz wird im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau herausgegeben vom DLR Rheinhessen-Nahe-Hunsrück. Aus einer Auswertung von 29 Stationen des DWD und des DLR wurden die Jahresniederschläge der Jahre 2015-2024 gemittelt und aus diesen Werten eine Isohyetenkarte (Karte mit Linien gleicher Niederschlagssumme) gezeichnet. Die Karte (Abb. 17) zeigt, wie die Niederschläge von West nach Ost abnehmen. Hierbei wird ein Minimum im Rhein Hessischen Tafel- und Hügelland erreicht, mit durchschnittlichen Niederschlagssummen zwischen 500 und 600 mm. Es bildet sich, wie im DIERCKE Weltatlas angedeutet, der hygrische „Fußabdruck“ im nördlichen Teil des Oberrheingrabens heraus. Deutlich werden auch zwei Trockenzonen: einmal 20 Kilometer nordnordöstlich vom Donnersberg, bei Sprendlingen (487 mm) und 15-20 Kilometer ostnordöstlich, um Gundersheim (489 mm). Alle ausgewerteten Stationen weisen mehr als 500 mm Niederschlag auf. Die Niederschläge steigen östlich und südlich von Gundersheim wieder an; hier macht sich bereits der beginnende Luv-Effekt des Odenwaldes bemerkbar.

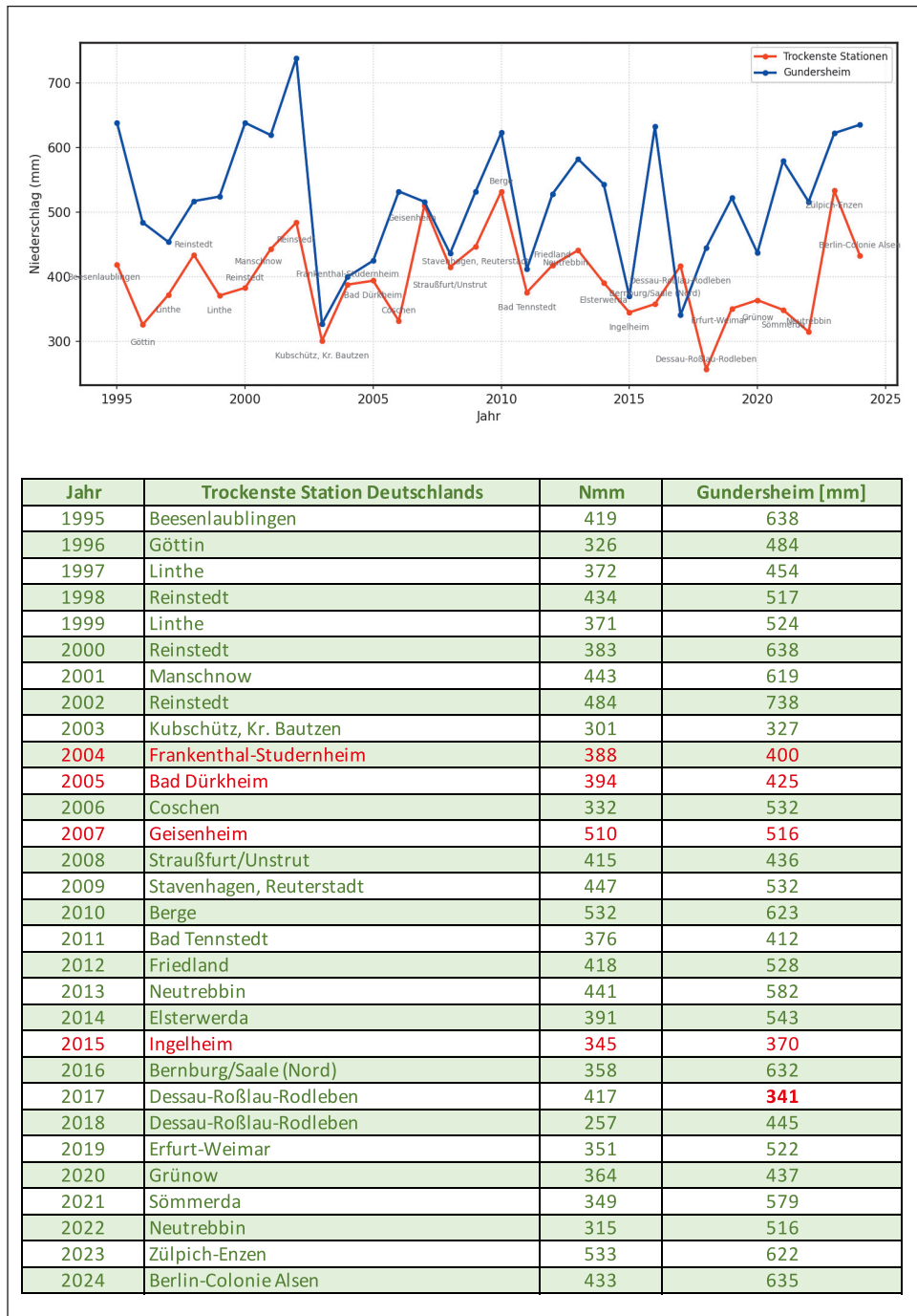


Abb. 16: Liste der Jahresniederschlagssummen der trockensten Stationen Deutschlands 1995-2024 im Vergleich zu Gundersheim. Rechts: Vergleich des Niederschlags: Trockenste Stationen vs. Gundersheim.

8. Auswertung von Temperaturschwellenwerten für den Zeitraum 1995-2024 in Gundersheim

Schwellenwerte der Temperatur sind sehr hilfreich zur weiteren Kennzeichnung der klimageographischen Prägung. Einige sollen auch hier für Gundersheim zur Anwendung gebracht werden:

Tabelle 2: Schwellenwerte der Temperatur in der Klimatologie.

Sommertag	$T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$
Heißer Tag	$T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$
Tropennacht	$T_{\min} \geq 20 \text{ °C}$
Frosttag	$T_{\min} \leq 0 \text{ °C}$
Eistag	$T_{\max} \leq 0 \text{ °C}$

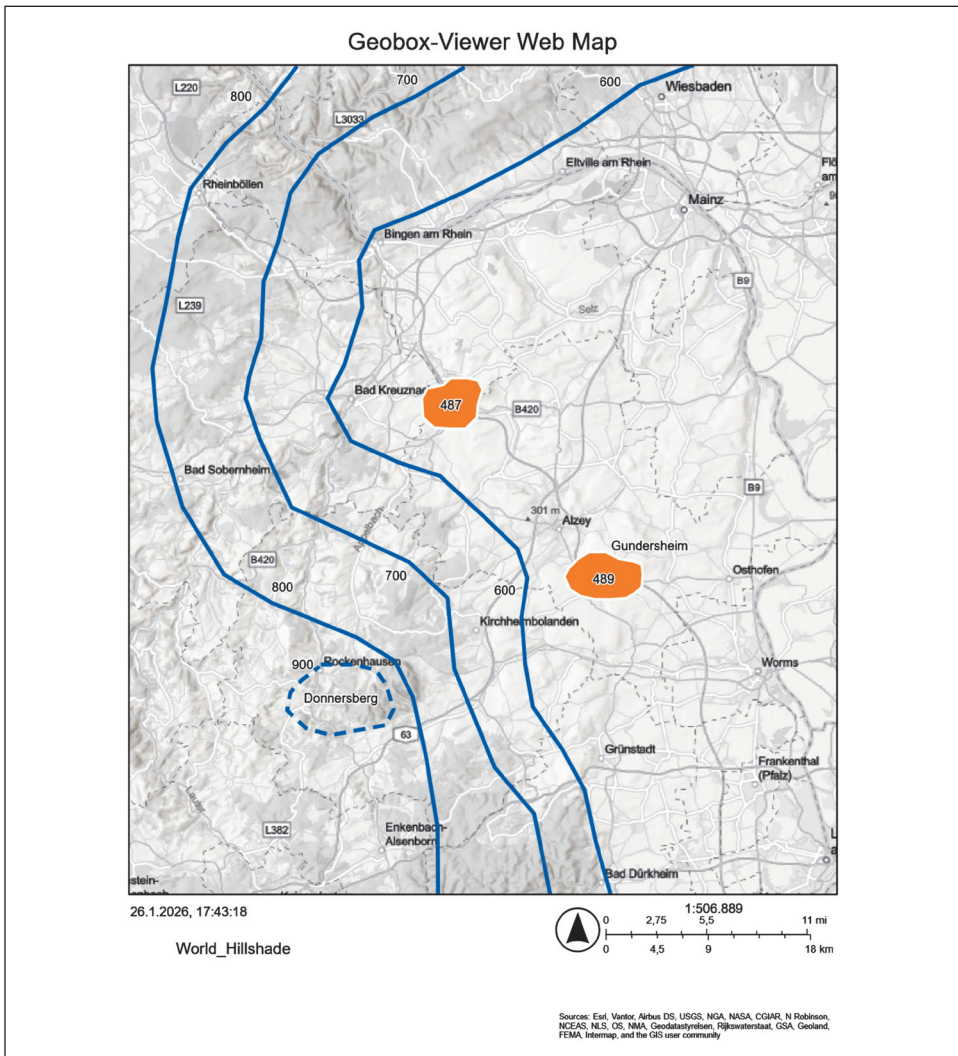


Abb. 17: Isohyendarstellung der Dekade 3 (2015-2024) von Rheinhessen mit hervorgehobenen Trockeninseln (gelb). Kartengrundlage: GeoBox-Viewer: <https://geobox-i.de/GBV-RLP/>. Datengrundlage: Deutscher Wetterdienst, Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum (DLR).

Wird die Anzahl der Sommertage und heiße Tage in Gundersheim betrachtet (Abb. 18), zeigt sich, dass diese zunehmen: Gab es Ende der 1990er Jahre noch um die 60 Sommertage, so sind es aktuell durchschnittlich 90 Sommertage. Allerdings ist diese Zunahme mit Vorsicht zu interpretieren, denn in den Jahren 2000 bis 2015 gab es eine Stagnation bei der Anzahl der Sommertage: Durchschnittlich 60 Tage gab es in diesen Jahren zu verzeichnen, an heißen Tagen gab es in diesem Zeitraum 15-20 Tage. Auffällig sind die großen interannuellen Schwankungen. Dies zeigt sich auch bei den nachfolgenden Analysen von weiteren thermischen Schwellenwerten.

Die Anzahl heißer Tage nimmt – wenn auch nur leicht – zu: Der Trend beginnt bei 20 heißen Tagen im Jahr 1995 und endet bei 28 heißen Tagen im Jahr 2024.

Die Feststellung, dass es immer wärmer wird, geht auch einher mit der Tatsache, dass es immer weniger Frost- und Eistage gibt (Abb. 19). Gab es zu Beginn der Beobachtungsperiode noch durchschnittlich 80 Frosttage, so ist diese Anzahl auf unter 40 Tage gesunken. Immer weniger Frost bedeutet folglich auch weniger Eistage. Betrüge die Zahl der Eistage im Jahr

1995 noch durchschnittlich 20 Tage, so sind es aktuell nur noch 5 Tage. Hier wird der Klimawandel besonders sichtbar innerhalb der untersuchten 30-jährigen Datenreihe 1995-2024.

Bei der Anzahl der Tropennächte von 1995 bis 2024 (Abb. 20) wird deutlich, dass auch die Nächte immer wärmer werden, was erhebliche bioklimatische Auswirkungen hat, denn dies sorgt für schlaflose Nächte bei vielen Menschen, insbesondere in den Städten und Ballungsräumen. Waren es früher keine oder eine Tropennacht pro Jahr, so sind in den letzten Jahren bis zu 5 oder gar 12 Tropennächte registriert worden.

Die Niederschlagsintensität in Gundersheim ist auch ein wichtiges Maß für den Klimacharakter und seine zeitliche Veränderung 1995-2024 im Kontext des Klimawandels (Abb. 21). Ein Regentag ist definiert als Mindestregensumme von 1 mm pro Tag. Geringere Niederschlagssummen sind unbedeutend und werden nicht berücksichtigt. Die Niederschlagsintensität wird berechnet nach der Regengenmenge pro Jahr geteilt durch die Anzahl der Regentage. Die Niederschlagsintensität hat im Zeitraum leicht zugenommen. Aus dem

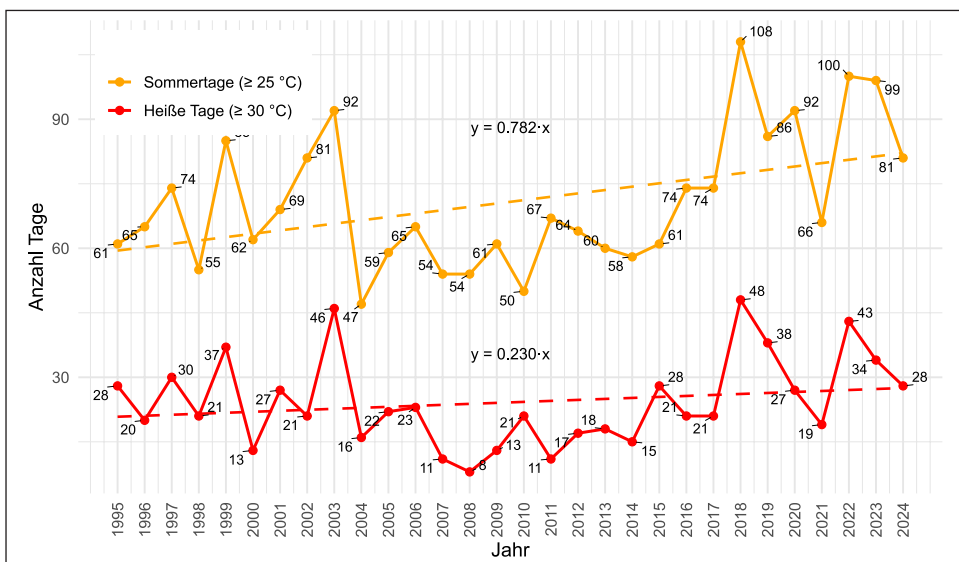


Abb. 18: Anzahl der heißen Tage und Sommertage pro Jahr (1995-2024) mit Trendlinie.

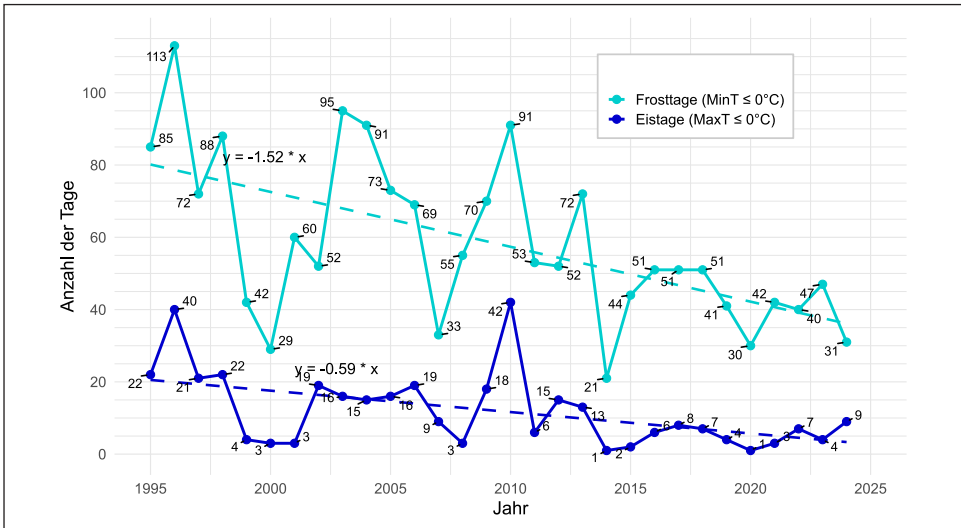


Abb. 19: Anzahl der Frost- und Eistage pro Jahr (1995-2024) mit Trend.

Diagramm lässt sich leicht ersehen, dass es in den 1990er Jahren noch eine Niederschlagsintensität von 4,8 mm pro Regentag gab, im Verlauf bis zum Jahr 2024 hat sich diese aber auf 5,3 mm pro Regentag erhöht. Der lineare Trend mag keine Voraussicht in die Zukunft

sein, doch lässt sich herleiten, dass aus höheren Niederschlägen innerhalb kurzer Zeit größere Probleme zu erwarten sind, gehen diese doch einher mit Starkniederschlägen, die mit den Konsequenzen Überflutungen, vollgelauenen Kellern und Erosion zu tun haben.

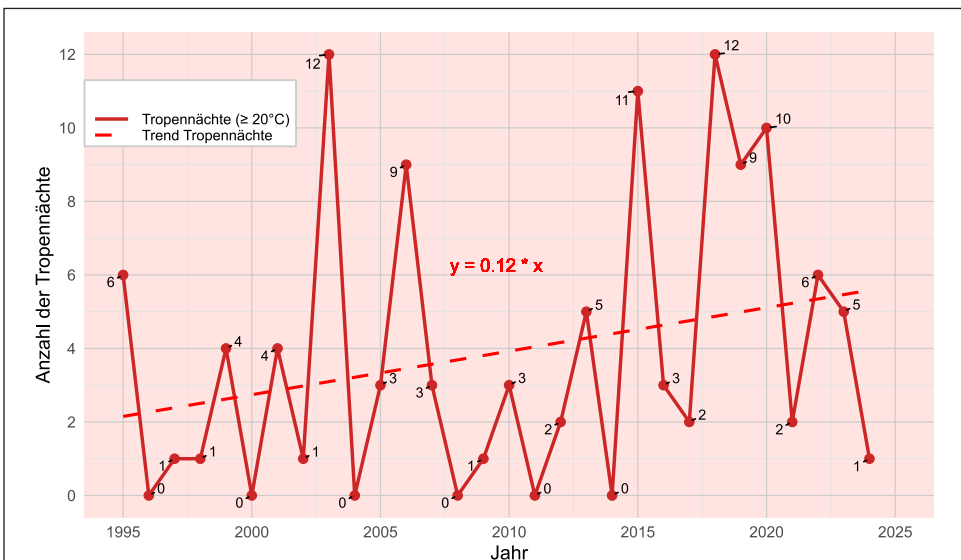


Abb. 20: Anzahl der Tropennächte pro Jahr (1995-2024) mit Trend.

Die Analyse der Vegetationstage von 1995 bis 2024 zeigt einen deutlichen Anstieg der Tage mit einer Tagesmitteltemperatur von mindestens 5 °C, der lineare Trend weist einen Anstieg von etwa 0,8-1,0 Tagen pro Jahr aus, das entspricht einem Zuwachs von ca. 30 Tagen in 30 Jahren – also fast ein zusätzlicher Vegetationsmonat. Während Ende der 1990er Jahre durchschnittlich etwa 250 Vegetationstage gezählt wurden, überschreiten viele Jahre der 2010er Jahre die Marke von 280 bis 290 Tage, in den 2020er Jahren liegt der Wert bereits bei 300 Tagen und mehr. Dieser Trend weist auf eine Verlängerung der Vegetationsperiode hin, die vor allem durch den Klimawandel und milder werdende Winter begünstigt wird.

9. Korrelation zwischen Temperatur, Niederschlag, Sonnenflecken und CO₂-Gehalt der Atmosphäre

Das Klima ist ein Zusammenspiel sehr verschiedenartiger Einflüsse. Es soll untersucht werden, welchen Einfluss die Sonnenaktivität sowie der CO₂-Gehalt darstellen. Hierzu wurde eine Tabelle erstellt, die die

Jahresmitteltemperaturen mit den Jahresniederschlägen, Sonnenfleckenrelativzahlen und CO₂-Werten von 1995-2024 aufzeigt. Als Quelle für die CO₂-Werte wurde die Webseite des Umweltbundesamtes genutzt (<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#kohlendioxid>). Als Quelle für die Sonnenfleckenrelativzahlen wurde die Webseite von Meteo.Plus verwendet (<https://meteo.plus/sonnenaktivitaet.html>).

Die Sonnenfleckenrelativzahl ist ein leicht zu bestimmendes Maß für die Aktivität der Sonne, die normalerweise in einem ca. 11-jährigen Zyklus (SCHWABE-Zyklus) schwankt. Die Bestimmung der Sonnenfleckenrelativzahl bestimmt sich nach folgender Formel: $R = (10 \cdot g) + f$, wobei g die Anzahl der Fleckengruppen auf der Sonne und f die Einzelflecken in allen Gruppen darstellen. Setzt man in die Formel z. B. Anzahl der Fleckengruppen = 4 und Einzelflecken in allen Gruppen = 77 ergibt sich $R = 117$. Hierbei stellt R die Sonnenfleckenrelativzahl dar. Im Mittel dauert ein Sonnenfleckenzyklus, gemessen von Minimum zu Minimum, etwa 11 Jahre. Beobachtet wurden unterschiedlich starke Zyklen

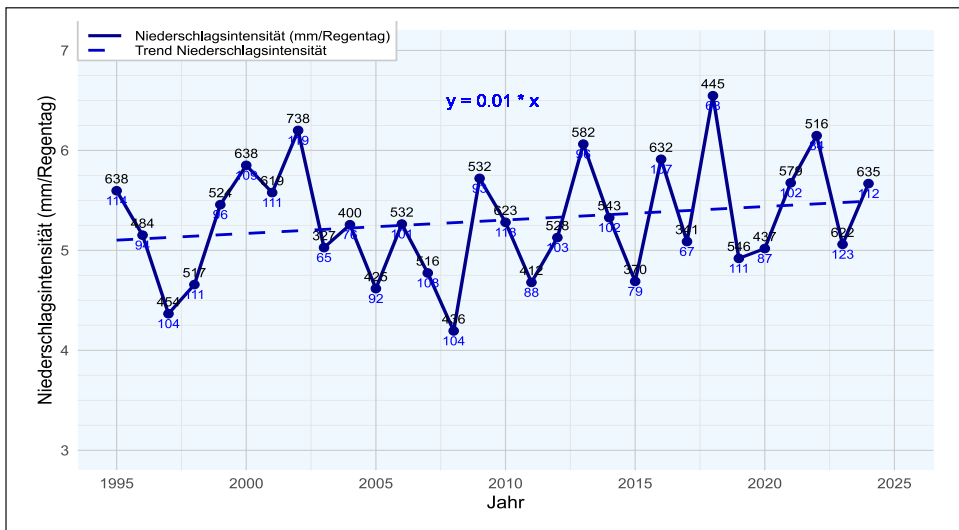


Abb. 21: Niederschlagsintensität pro Jahr (1995-2024) mit Trend.

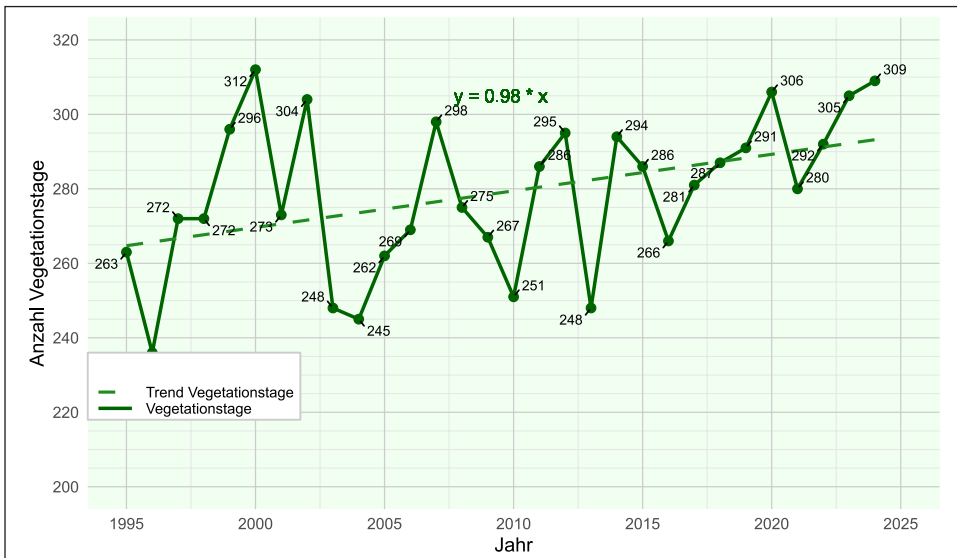


Abb. 22: Vegetationstage pro Jahr (1995-2024) mit Trend

mit Längen zwischen 9 und 14 Jahren. Es ist bekannt, dass die Sonnenaktivität das Klima beeinflusst. Im 16. und 17. Jahrhundert wurden keine oder nur ganz wenige Sonnenflecken auf der Sonne beobachtet, man spricht vom sogenannten Maunder-Minimum. In diese Zeiten fällt auch die sogenannte „Kleine Eiszeit“, die in Europa markante Folgen hatte (u. a. Hungersnöte). Es gab jahrzehntelang kühle Sommer und sehr niedrige Temperaturen mit zugefrorenen Flüssen und Seen im Winter. Viele Bilder damaliger Künstler (u. a. Pieter BREUGEL der Ältere: „Die Jäger im Schnee“ aus dem Jahr 1565) zeigen Menschen auf zugefrorenen Flüssen bzw. Kanälen insbesondere in den Niederlanden. Somit soll auch der mögliche Einfluss der Sonnenaktivität rezent betrachtet werden.

In einer Grafik sind die Sonnenfleckenrelativzahlen den Jahresmitteln der Temperatur gegenübergestellt. Es zeigt sich keine signifikante Korrelation der beiden Variablen. Zwar weisen einzelne Jahre durchaus einen Zusammenhang auf, diese sind aber über den gesamten Verlauf der Beobachtungsperiode nicht signifikant. So gab es in den Jahren 2002 und 2003 im Maximum des 23. Son-

nenzyklus überdurchschnittlich warme Jahresmittel zu verzeichnen (11,3 °C / 10,6 °C), beim Übergang vom 23. zum 24. Zyklus im Jahr 2009 ein immer schon leicht unterdurchschnittlich warmes Jahr (10,6 °C), im darauffolgenden Jahr wurde das zweitkälteste Jahr verzeichnet (9,4 °C). Alle Monate des Jahres 2010 waren mit Ausnahme des Julis deutlich kühler, teils bis zu 4 K unter dem Gesamtdurchschnitt: Januar, Februar und Dezember lagen 3,9 K, 2,3 K und 4,7 K unter dem Gesamtdurchschnitt. Es sind andere Klimafaktoren, die die Temperatur in jüngster Zeit beeinflussen; u. a. der zusätzliche anthropogene Treibhauseffekt durch den enormen Ausstoß von klimarelevanten Gasen seit 1850. Durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe (Kohle, Öl, Gas) reichert sich das CO₂ in der Atmosphäre an: Der Anstieg betrug vor 1950 etwa 0,5 ppm pro Jahr, seit 1950 erfolgte ein beschleunigter Anstieg (ca. 2 ppm pro Jahr). Seit 2000 liegt ein sehr schneller Anstieg vor (ca. 2,5 ppm pro Jahr). Durch die zunehmende Abholzung von Wäldern wird immer weniger CO₂ gespeichert. Zudem sorgen Industrialisierung und Verkehr für den immer stärker werdenden Anstieg von CO₂.

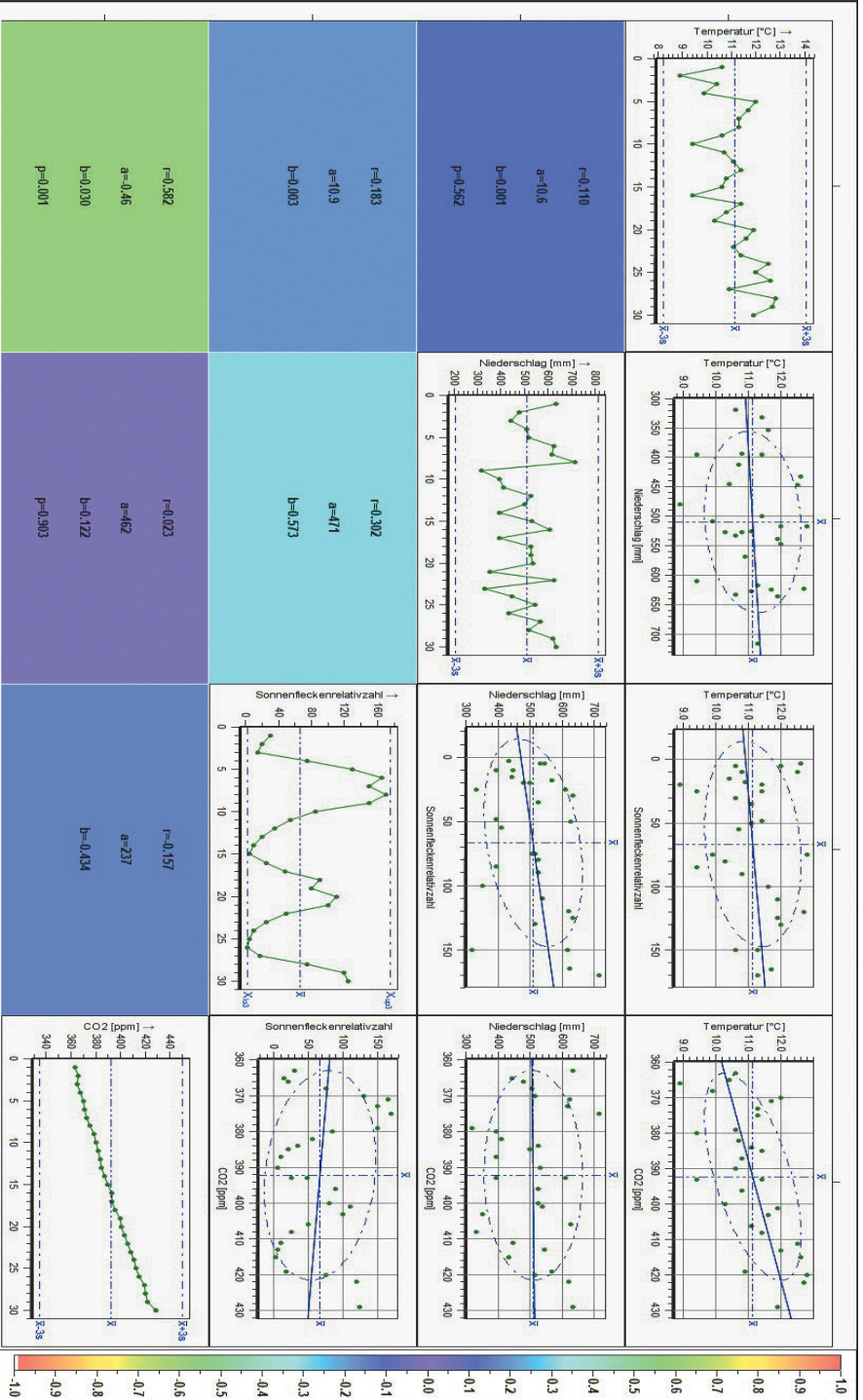


Abb. 23: Korrelationsmatrix der Variablen Temperatur, Niederschlag, Sonnenfleckenzahl und CO₂ im Zeitraum 1995-2024. Quellen: Meteo.Plus / Umweltbundesamt.

Wenn der Trend anhält, wird dies zu weiteren Temperaturanstiegen und extremen Wetterereignissen führen.

In der in Abb. 23 gezeigten Grafik handelt es sich um die Korrelationsmatrix der Variablen Temperatur, Niederschlag, Sonnenfleckenrelativzahl und CO₂ im Zeitraum von 1995-2024. Die Diagonale von oben links nach unten rechts enthält die Variablen Temperatur, Niederschlag, Sonnenfleckenrelativzahl und CO₂, der Zeitraum von 1995-2024 ist auf der Abszisse abgetragen, die Werte auf der Ordinate der jeweiligen Variable. In der linken unteren Hälfte sind in Farbe die Korrelationskoeffizienten dargestellt. Zur besseren Lesbarkeit werden die Koeffizienten farblich hervorgehoben: Blaue Farben bedeuten keine Korrelation, grün eine schwache Korrelation, orange bzw. rot starke Korrelation, d. h. einen starken Zusammenhang zwischen den Variablen. Es zeigt sich, dass Temperatur und CO₂ in einem größeren Zusammenhang stehen als die anderen Variablen, der Korrelationskoeffizient beträgt $r=0,5891$. Das Bestimmtheitsmaß berechnet sich auf 33,92 %. Das bedeutet, dass 33 % der Residuen auf den linearen Zusammenhang zurückgeführt werden können. Somit steht fest, dass hohe CO₂-Werte mit höheren Temperaturen im Einklang stehen. Der x-y-Plot in der rechten oberen Ecke zeigt diesen Zusammenhang recht deutlich. Jedes Wertepaar stellt ein Jahr dar, der Farbverlauf der Werte zeigt zusätzlich, dass die letzten

10 Jahre des 30-jährigen Beobachtungszeitraums die höchsten Temperaturen als auch die höchsten CO₂-Werte aufweisen. Immerhin ist noch ein schwacher Zusammenhang bei den Variablen Niederschlag und Sonnenfleckenrelativzahl zu erkennen: Allerdings beträgt hier der Korrelationskoeffizient nur $r=0,2798$. Die Grafik der Korrelation der Sommertage mit der Sonnenfleckenrelativzahl (Abb. 24) enthält für jeden Datenpunkt des Zeitraums 1995-2024 die entsprechende Jahreszahl für eine bessere Lesbarkeit. Die berechnete Korrelation beträgt etwa 0,12, was eine sehr schwache positive Korrelation darstellt. Der p-Wert von 0,52 zeigt, dass diese Korrelation statistisch nicht signifikant ist. Dies bedeutet, dass es keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Sonnenfleckenaktivität und der Anzahl der Sommertage gibt.

Die Korrelation der Sommertage mit CO₂ (Abb. 24) weist mit einem Wert von $r=0,45$ einen moderaten positiven Zusammenhang auf. Der p-Wert von 0,0124 deutet darauf hin, dass diese Korrelation statistisch signifikant ist. Dies legt nahe, dass ein Anstieg der CO₂-Konzentration mit einer Zunahme der Sommertage zusammenhängen könnte.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Korrelationsanalyse mit den Klimadaten der letzten 30 Jahre ergab, dass CO₂ eine starke positive Korrelation mit der Temperatur (0.58) hat, was darauf hindeutet, dass höhere

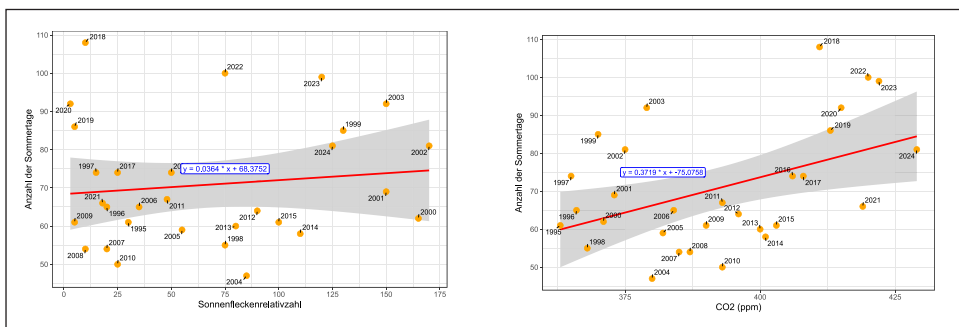


Abb. 24: Korrelation zwischen Sonnenflecken und Sommertagen mit Trend und 95%-Konfidenzbereich (1995-2024), $r=0,12$, $p=0,52$ (links). Korrelation zwischen CO₂ und Sommertagen mit Trend und 95%-Konfidenzbereich (1995-2024), $r=0,45$, $p=0,0124$ (rechts).

CO₂-Werte mit höheren Temperaturen zusammenhängen. Dies entspricht dem bekannten wissenschaftlichen Zusammenhang zwischen Treibhausgasen und globaler Erwärmung. Ebenso korreliert die Anzahl der Sommertage mit der CO₂-Konzentration. Insbesondere in den letzten 10 Jahren (2015-2024) gab es Jahre mit einer überdurchschnittlich hohen Anzahl von Sommertagen, welche mit den hohen Werten von CO₂ korreliert.

Die Sonnenfleckenrelativzahl hat eine schwache positive Korrelation mit Niederschlag (0.30) und Temperatur (0.18). Dies deutet darauf hin, dass mit höherer Sonnenaktivität auch höhere Niederschläge einhergehen. Dies könnte mit Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation zusammenhängen. Die Korrelation der Sonnenflecken mit den CO₂-Werten ist leicht negativ (-0.15), was bedeutet, dass Sonnenaktivität nicht direkt mit CO₂-Werten korreliert. Das bestätigt, dass CO₂-Emissionen durch menschliche Aktivitäten dominiert werden.

Die Korrelation zwischen CO₂ und Niederschlag ist sehr gering (0.02), was auf keinen direkten Zusammenhang hinweist. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass CO₂ den größten Einfluss auf die Temperatur hat. Sonnenflecken spielen nur eine kleine Rolle bei Temperatur- und Niederschlagsänderungen. Niederschlag und Temperatur hängen kaum miteinander zusammen.

10. Entwicklung von Kälte- und Wärmesummen in Gundersheim

Für die Beurteilung des meteorologischen Winters wird die Kältesumme der Monate Dezember, Januar und Februar herangezogen. Aufsummiert werden alle negativen Tagesmitteltemperaturen des Zeitraums.

Die thermische Beurteilung des Winters sieht dann wie folgt aus.

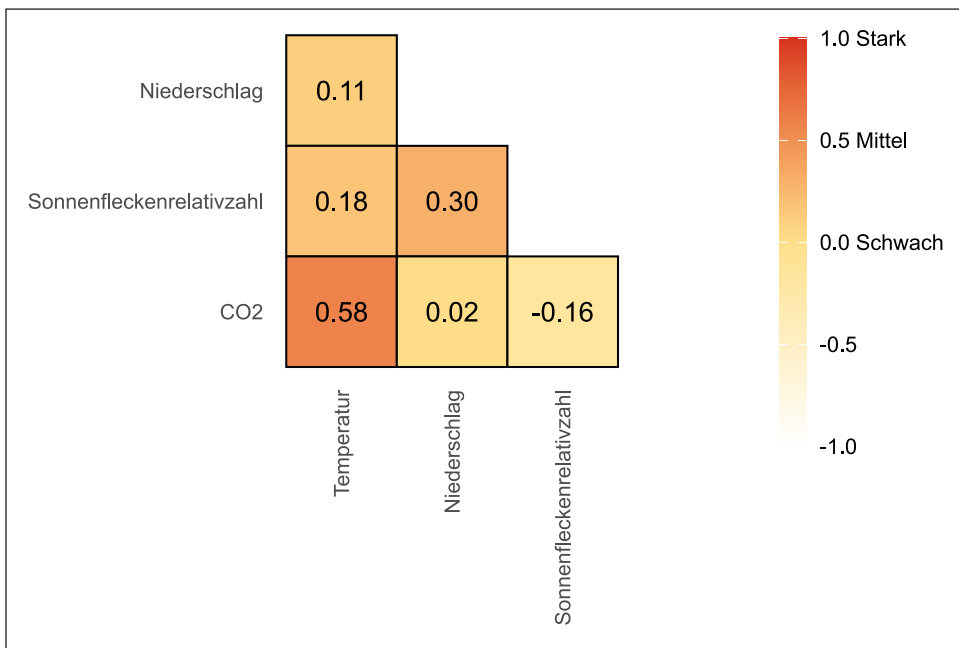


Abb. 25: Korrelationskoeffizienten der Variablen Temperatur, Niederschlag, Sonnenfleckenrelativzahl und CO₂. Quellen: Meteo.Plus/ Umweltbundesamt.

Tabelle 3: Beurteilung des Winters anhand der Kältesumme.

Summe < 100	sehr milder Winter
Summe 100-200	normaler Winter
Summe 201-300	mäßig strenger Winter
Summe 301-400	strenger Winter
Summe > 400	sehr strenger Winter

Mit Ausnahme der Jahre 1995-1997, 2002, 2003, 2006, 2009-2010 und 2012 gab es im Betrachtungszeitraum nur milde Winter (Abb. 26). Die Trendkurve zeigt einen abnehmenden Trend, fast 3 °C nimmt die Kältesumme pro Jahr ab. In den letzten 10 Jahren beträgt die Kältesumme durchschnittlich nur 35 °C. Nur 9 von 30 Winter sind als „normal“ zu bezeichnen (Abb. 26).

Für die Ermittlung der Wärmesumme werden die Tagesmittel-Temperaturwerte größer gleich 5 °C aufsummiert und für jedes Jahr des Zeitraums 1995-2024 dargestellt (Abb. 27). Da sich die Vegetationsperiode infolge der Klimaerwärmung stetig verlängert (Abb. 22), nehmen auch die Wärmesummen stetig zu; pro Jahr um etwa 20 °C. Der Trend

zeigt eindeutig nach oben. Für erfolgreichen Weinbau ist eine Wärmesumme von 2.900 °C aufwärts erforderlich, diese Voraussetzung ist im Fall von Gundersheim in allen Jahren gegeben. Andere landwirtschaftliche Kulturen kommen mit deutlich geringeren Wärmesummen aus:

Sonnenblumen > 1.450 °C, Mais 1.450-1.700 °C, Sommerweizen 1.870-2.275 °C, Sommerroggen 1.750-2.190 °C, Sommergerste 1.700-2.500 °C, Hafer 2.340-2.730 °C, Erbsen 2.100-2.800 °C, Sommerraps 1.700-1.900 °C, Lein 1.600-1.850 °C, Kartoffeln 1.300-3.000 °C, Runkelrüben 2.400-2.700 °C, Wein > 2.900 °C.

In der Agrarmeteorologie dient die Grünlandtemperatursumme als wichtiger Indikator zur Bestimmung des Vegetationsbeginns. Hierbei werden alle positiven Tagesmitteltemperaturen seit Jahresbeginn aufsummiert, wobei eine monatliche Gewichtung erfolgt: Im Januar wird das Tagesmittel mit dem Faktor 0,5 multipliziert, im Februar mit 0,75. Ab März fließen die Temperaturen ungekürzt ein. Erreicht die Summe 200 Grad, gilt dies als Zeichen für einen nachhaltigen

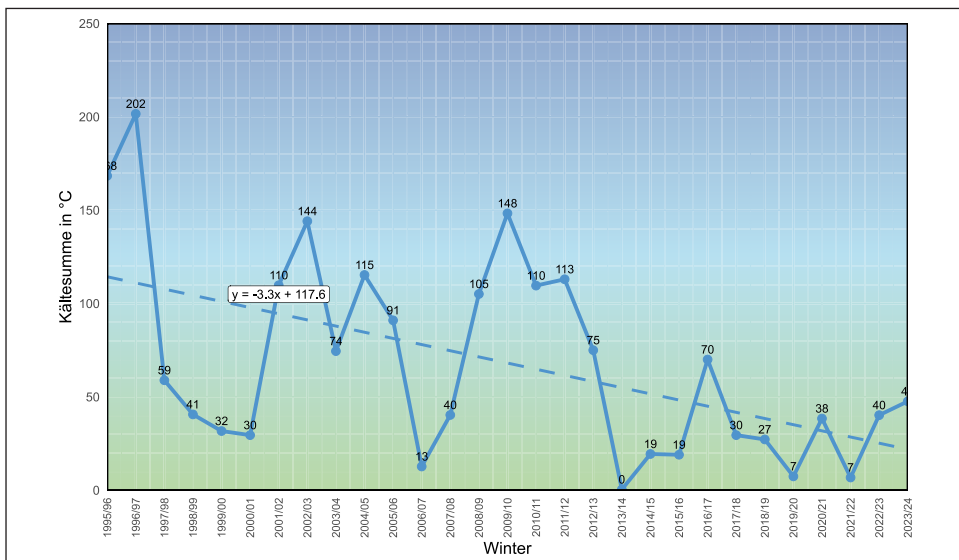


Abb. 26: Summe der negativen Tagesmittel (Kältesumme) pro Winter (Dezember-Februar), 1995-2024.

Vegetationsbeginn. In Mitteleuropa markiert dieser Wert traditionell den Startzeitpunkt für Feldarbeiten und den agrarmeteorologischen Frühling. In dieser Phase beginnt üblicherweise die Düngerausbringung, da eine frühere Anwendung aufgrund der noch fehlenden Bodenaktivität ineffektiv wäre. Interessanterweise fällt das Erreichen der 200-Grad-Marke häufig mit der Blüte der Forsythien zusammen. Das GANTT-Diagramm, auch Balkenplan genannt, ist eigentlich ein Tool des Projektmanagements (Abb. 28).

In der Grafik wird auf der x-Achse das Datum dargestellt, auf der y-Achse die Jahre von oben nach unten. Die Balken enden bei dem Datum, bei welchem die Wärmesumme von 200 °C erreicht ist. Es zeigt sich, dass dieses Datum immer früher erreicht wird, die Trendlinie verdeutlicht diese Tatsache.

Lag das Datum vor 30 Jahren Anfang bis Mitte April (1995 / 1996), so verfrühte sich dieser Termin auf Anfang bis Mitte März in den letzten 10 Jahren (2015-2024). Der kürzeste Termin der Wärmesumme 200 °C wurde 2024 erreicht (26. März). Mit dem immer früheren Eintritt des Vegetationsbeginns werden auch frühere Erntetermine für viele Kulturen erreicht.

11. Zusammenfassung und Ausblick

Die 30-jährige Studie zeigt, dass Gundersheim einer der thermisch begünstigsten und trockensten Orte Deutschlands ist, der durch seine außergewöhnliche Lage am Ostrand des Rhein Hessischen Tafel- und Hügellandes gelegen ist und dadurch eine ganz ausgeprägte Schutzlage durch die von West nach Ost gelegenen Mittelgebirge Ardennen, Eifel, Hunsrück und Nordpfälzer Bergland aufweist. Insbesondere der Donnersberg fungiert als „Eckpfeiler“, der das Abregnen der atlantischen Luftmassen intensiviert und so die südliche Region Rhein Hessens als Trockeninsel erscheinen lässt.

Die im Mittel 500 mm Niederschlag pro Jahr werden nur im Osten Deutschlands durch einzelne Orte im Lee des Harzes unterboten. Der Trend der Temperatur zeigt einen Anstieg, der primär durch die Auswirkung des vom Menschen verursachten Treibhauseffektes zurückzuführen ist. Die bestehende Wetterstation in Gundersheim soll auch in Zukunft weiter betrieben werden, um die festgestellten Trends weiter zu beobachten und zu analysieren.

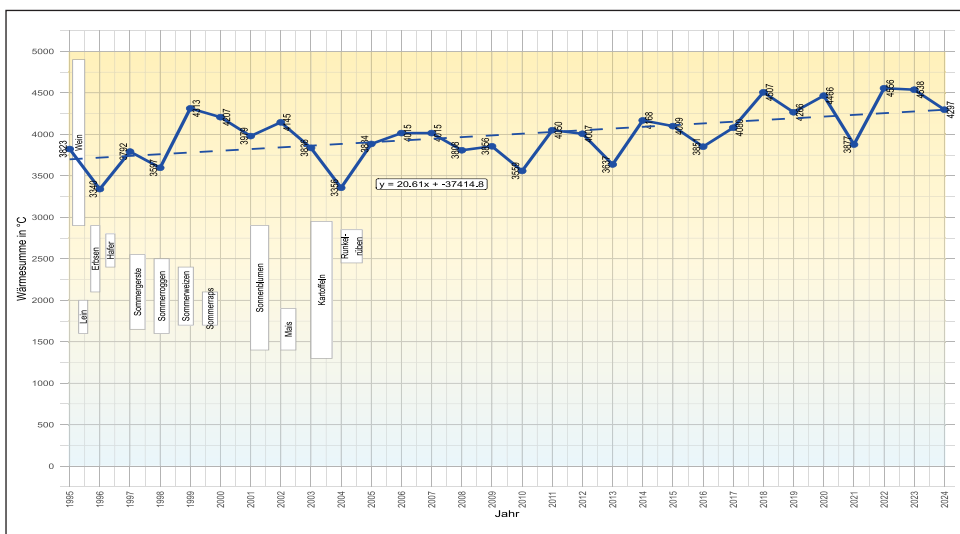


Abb. 27: Summe der Tagesmittel-Temperaturwerte (Wärmesumme) in der Vegetationsperiode ($\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$), 1995-2024.

12. Danksagung

Martin WERNER spricht seiner Frau Sabine und seinem Sohn Paul seinen tiefen Dank aus, da sie viele Stunden entbehrten, um die Entstehung dieser Arbeit zu ermöglichen. Sein besonderer Dank gilt seinem Vater, Herrn Hubert WERNER (Gundersheim), der bedauerlicherweise im Jahr 2019 verstarb. Ein weiterer Dank gilt seinem Bruder Andreas WERNER, der nach dem Tod des Vaters dem Projekt sehr wohlwollend gegenüberstand und schon oft bei Pflegemaßnahmen tatkräftig mithalf. Hans-Joachim FUCHS dankt allen Beteiligten in Gundersheim für ihren unermüdlichen Einsatz bei der Leitung und Betreuung der Station über die vielen Jahre hinweg.

13. Literatur

- AMBOS, R. & KANDLER, O. (1987): Einführung in die Naturlandschaft. – 1-28. In: JUNGBLUTH, J. H. [Hrsg.]: Der Mainzer Sand – Beiträge zur Monographie des Naturschutzgebiets Mainzer Sand und seiner näheren Umgebung. – Mainzer Naturwissenschaftliches Archiv **25**: 608 S., Mainz.
- DIERCKE Weltatlas (2023): 336 S., Westermann. Braunschweig.
- FUCHS, H.-J. & HOFMANN, U. (2006): Der Donnersberg in der Nordpfalz als wirksamer Klimafaktor. – Mainzer Naturwissenschaftliches Archiv **44**: 71-85. Mainz.
- FUCHS, H.-J. & KAFFENBERGER, B. (2007): Umweltwahrnehmung hinsichtlich der klimaökologischen Gegebenheiten am Donnersberg/Pfalz. – Mitteilungen der POLLICHIA **92**: 9-32. Bad Dürkheim.

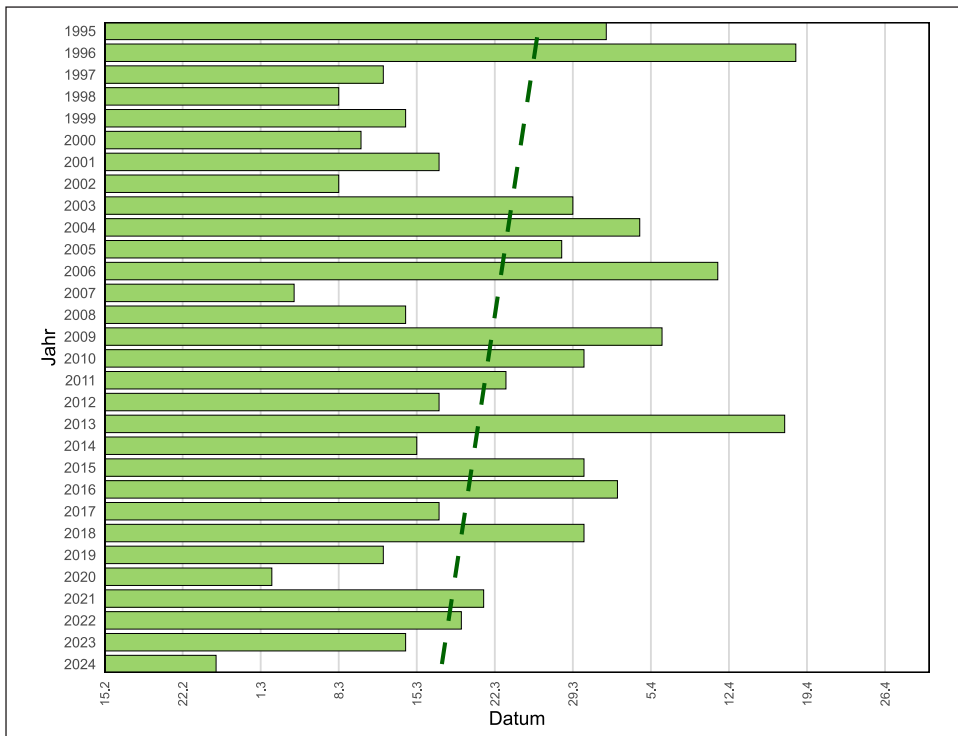


Abb. 28: Darstellung des Termins des Erreichens der Wärmesumme von 200 °C mit eingezeichneter Trendlinie, 1925-2024.

- FUCHS, H.-J. & STEINHAEUER, T. (2008): Der Klimafaktor ‚Donnersberg‘ mit seinen kleinräumigen Impakten – Konzeption eines interaktiven Klimalermpfadens. – *Mainzer Naturwissenschaftliches Archiv* **45**: 41-60. Mainz.
- FUCHS, H.-J. & WERNER, M. (1995): Das Jahr 1994 in Gundersheim. Eine witterungsklimatische Skizze. – *Landkreis Alzey-Worms, Heimatjahrbuch* **1996**: 172-178. Alzey.
- FUCHS, H.-J. & WERNER, M. (1996): Geländeklimatische Untersuchungen im südlichen Rheinhessischen Tafel- und Hügelland – am Beispiel von Gundersheim. – *Landkreis Alzey-Worms, Heimatjahrbuch* **1997**: 133-142. Alzey.
- FUCHS, H.-J. & WERNER, M. (1997): Eine Analyse der Niederschlagsverhältnisse in Gundersheim. – *Landkreis Alzey-Worms, Heimatjahrbuch* **1998**: 147-154. Alzey.
- FUCHS, H.-J. & WERNER, M. (1998): Stationäre und mobile Messungen zur Erfassung des Topoklimas im Gemarkungsgebiet von Gundersheim/Rheinhessen. – *Mitteilungen der POLLICHIA* **83**: 37-65. Bad Dürkheim.
- FUCHS, H.-J. & WERNER, M. (2002): Zur Klimaökologie des Donnersbergs in der Nordpfalz. – *Mitteilungen der POLLICHIA* **87**: 19-41. Bad Dürkheim [2000].
- FUCHS, H.-J. & WERNER, M. (2014): Klimageographische Kennzeichen und Besonderheiten im südlichen Rheinhessen am Beispiel von Gundersheim. – *Mainzer Naturwissenschaftliches Archiv* **51**: 7-32. Mainz.
- FUCHS, H.-J. & WERNER, M. (2019): Geländeklima-Messnetz in Gundersheim – eine rück- und ausblickende Analyse. – 56-76. In: *Heimatverein Gundersheim e. V.* [Hrsg.]: *Ein Lesebuch – 1250 Jahre Gundersheim. – 109 S., Gundersheim.*
- KÖPPEN, W. (1918): Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag and Jahreslauf. – *Petermanns Geographische Mitteilungen* **64**: 193-203 u. 243-248.
- LESER, H. (1969): *Landeskundlicher Führer durch Rheinhessen: Rheinhessisches Tafel- und Hügelland.* – X + 253 S., Borntraeger. Berlin.
- SCHÖNWIESE, C.-D. (2008): *Klimatologie.* – 42 S., Eugen Ulmer. Stuttgart.
- TROLL, C. (1943): *Thermische Klimatypen der Erde.* – *Petermanns Geographische Mitteilungen* (**89**): 81-89. Gotha.

14. Online-Quellen

- DEUTSCHER WETTERDIENST: https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/nieder_8110_akt_html.html?view=as-Publication&nn=16102 [Zugriff: 26.02.2025].
- DIENSTLEISTUNGSZENTRUM LÄNDLICHER RAUM RHEINLAND-PFALZ – Agrarmeteorologie: <http://wetter.rlp.de/> [Zugriff: 26.02.2025].
- DLR Rheinhessen-Nahe-Hunsrück, Abteilung Technische Zentralstelle <http://wetter.rlp.de/Internet/global/inetcntr.nsf/> [Zugriff: 26.02.2025].
- GEO-BOX VIEWER von Esri, Intermap, NASA, NGA, USGS, Esri Community Maps Contributors, HVBG, LVermGeo RP, IGN 2022 – Esri France 2022, Esri, TomTom, Garmin Kartenlayer: Topographische Karte 1 : 25.000: <https://geobox-i.de/GBV-RLP/> [Zugriff: 05.02.2025].
- KLIMASTATION GUNDERSHEIM: <https://www.Klimastation-Gundersheim.de> [Zugriff: 30.03.2025].
- METEO PLUS: <https://meteo.plus/sonnenaktivitaet.html> [Zugriff: 26.02.2026].
- MTWETTER: <https://www.mtwetter.de/> [Zugriff: 05.02.2026].

Anschriften der Verfasser

Prof. Dr. Hans-Joachim Fuchs
 Geographisches Institut
 Johannes Gutenberg-Universität Mainz
 D-55099 Mainz
 E-Mail: hans.fuchs@uni-mainz.de
 Homepage: <https://www.geo.uni-mainz.de/personen/fuchs/>

Dipl.-Geogr. Martin Werner
 Posener Platz 10
 D-68307 Mannheim
 E-Mail: martin.werner_69@web.de
 Homepage: <https://www.klimastation-gundersheim.de>

Manuskript eingegangen: 01.04.2025