

I. Basisinformation	
Kontakt	Bodendaten.LFULG@smekul.sachsen.de FachzentrumKlima.lfulg@smekul.sachsen.de
Letzte Aktualisierung:	12/2023
Fortschreibungszyklus:	jährlich
Interne Nummer: I-B1	A. Verlauf der Bodentemperatur und Trendentwicklung B. Trend der Überschreitung von 5 °C im Oberboden im Frühjahr und Unterschreitung von 5 °C im Oberboden im Herbst
Kurzbeschreibung und Einheit:	A. Trend der Jahresmitteltemperatur in verschiedenen Bodentiefen in °C (Grad Celsius) in den letzten 20-30 Jahren (je nach Messzeitraum). Zum Vergleich wird der Trend der Lufttemperatur dargestellt. B. Zu-/Abnahme des Tages im Jahr, ab dem die Bodentemperatur (Tagesmittel) in 5 cm Bodentiefe über 5 °C steigt (Frühjahr) bzw. unter 5 °C fällt (Herbst)
Berechnungsvorschrift:	A. Berechnung der Jahresmittelwerte der Bodentemperaturen aus Tagesmittelwerten der Messstationen. Es wurden Stationen der Bodendauerbeobachtung, Agrarmeteorologische Stationen sowie Wetterstationen des DWD mit Bodentemperatur-Messreihen von jeweils > 20 Jahren einbezogen. Für den jeweiligen Messzeitraum wurde der Trend der Bodentemperaturentwicklung für jeden Standort berechnet (lineare Regression und Prüfung der Trendsignifikanz mittels Mann-Kendall-Test mit $p < 0,05$). Zusätzlich wurde der Trend der Lufttemperatur in 2 m Höhe für den Zeitraum 1992-2022 berechnet. B. Es wurde jeweils der Tag d des Jahres ermittelt, ab dem die Tagesmittelwerte der Bodentemperaturen in 5 cm Bodentiefe im Frühjahr über 5 °C steigen (an mindestens fünf aufeinanderfolgenden Tagen) bzw. im Herbst unter 5 °C sinken. Für den Referenzzeitraum (Messbeginn bis 2013) werden diese Werte gemittelt (d_{ref}) und dem Mittelwert der letzten 10 Jahre (2014-2023) (d_{akt}) gegenübergestellt. Die Differenz D von d_{ref} und d_{akt} ergibt jeweils die Zu- oder Abnahme, also das früherer oder spätere Auftreten der 5 °C-Überschreitung ($D_{>5}$) im Frühjahr und der 5 °C-Unterschreitung ($D_{<5}$) im Herbst. Die statistische Signifikanz des Unterschieds von d_{ref} und d_{akt} wurde durch Mittelwertvergleich mittels Wilcoxon-Test geprüft ($p < 0,05$). Berücksichtigt wurden Stationen mit Datenreihen > 20 Jahre für Bodentemperaturen (Stand Dezember 2023), Einrichtung der Stationen zwischen 1991 und 2002
Interpretation des Indikatorwertes:	A. Ein signifikant positiver Trend der mittleren Jahrestemperatur zeigt den Anstieg der Bodentemperatur in der jeweiligen Bodentiefe über den betrachteten Zeitraum an. Ein signifikant negativer Trend stellt entsprechend langfristig absinkende Bodentemperaturen dar. Wurde kein statistisch signifikanter Trend festgestellt, waren die Bodentemperaturen über den Zeitraum konstant bzw. es kann derzeit keine eindeutige Aussage zur langfristigen Zu- oder Abnahme der Jahresmitteltemperatur im Boden getroffen werden. B. Im Fall der 5 °C-Überschreitung im Frühjahr zeigt ein positiver Wert der Differenz von Referenz- und aktuellem Zeitraum ($D_{>5}$) ein früheres Auftreten von Temperaturen > 5 °C im Oberboden an. Eine negative Differenz bedeutet eine verlängerte kalte Periode und spätere 5 °C-Überschreitung im Frühjahr.

	<p>Im Fall der herbstlichen 5 °C-Unterschreitung zeigen negative Differenzen ($D_{<5}$) eine später im Herbst auftretende Unterschreitung von Temperaturen < 5 °C im Oberboden an. Positive Differenzen stellen entsprechend ein früheres Auftreten der 5 °C-Unterschreitung im Herbst dar.</p>
II. Einordnung	
DPSIR	Impact
Handlungsfeld:	Boden
Themenfeld:	Bodenfunktionen/Bodentemperatur
Klimawirkung:	<p>Die Bodentemperatur wird im Wesentlichen durch die Lufttemperatur und den Strahlungshaushalt beeinflusst. Sie unterliegt im Tages- und Jahresverlauf natürlichen Schwankungen und wirkt direkt auf biologische, chemische und physikalische Prozesse im Boden ein. Bei Bodentemperaturen über 10 °C steigen beispielsweise die Aktivitäten von extrazellulären Enzymen und Mikroorganismen deutlich an. Dies begünstigt die Mineralisierung von Nährstoffen und den Abbau organischer Substanz im Boden während die Mikrobenaktivität sowie biochemische Prozesse bei Bodentemperaturen unter 0 °C nahezu zum Erliegen kommen (Onwuka 2016). Neben einer erhöhten Mineralisierung und Abbaurate organischen Bodenmaterials führt auch die mit der Temperatur sinkende Viskosität von Wasser zu einer besseren Verfügbarkeit von Nährstoffen für das Pflanzenwachstum. Außerdem wurden fördernde Effekte von steigenden Bodentemperaturen auf die Keimung sowie das Wurzel- und Sprosswachstum festgestellt (Onwuka 2016, Briones et al. 2008). Die 5 °C-Marke (Indikator B) kennzeichnet hier einen Mindestwert der Oberbodentemperatur, der für Wachstumsprozesse landwirtschaftlicher Kulturpflanzen und die Mobilisierung von Nährstoffen im Boden notwendig ist.</p> <p>Ein langfristig ansteigender Trend der Bodentemperaturen wirkt sich zudem auf bodenphysikalische Eigenschaften, insbesondere den Bodenwasser- und Lufthaushalt aus. Als Folge einer erhöhten mikrobiellen Aktivität ist mit einer erhöhten Produktion von CO₂ im Boden zu rechnen (Onwuka 2016). In Bezug auf den Wasserhaushalt fördern höhere Bodentemperaturen einen Anstieg der Verdunstungsrate, was die Sickerraten in tiefere Bodenschichten reduziert. Der verdunstungsbedingte Wasserverlust kann in trockenen Perioden zu einer Verstärkung der Trockenstressbedingungen und damit der Einschränkung der Organismenaktivität führen.</p>
Schwächen:	<p>Die zeitliche Variabilität des Indikators Bodentemperatur ist sehr hoch. Infolgedessen sind zuverlässige Trendaussagen erst nach langen Zeiträumen möglich. Durch die Betrachtung von Jahresmittelwerten werden saisonale Effekte nicht berücksichtigt.</p> <p>Die Wirkung von ansteigenden Bodentemperaturen können vielfältig sein und sich gegenseitig beeinflussen (z.B. erhöhte biologische Aktivität durch Temperatureffekt versus verringerte Aktivität durch Trockenstress (erhöhte Verdunstungsverluste).</p>
III. Bezüge	
Referenz auf andere Indikatorensystem	<p>Bodentemperatur (LANUV NRW) (zuletzt aufgerufen am 04.01.2024) Bodentemperatur (LAU Sachsen-Anhalt) (zuletzt aufgerufen am 04.01.2024)</p>

Fachpolitischer Bezug (z.B. EKP)	Energie- und Klimaprogramm Sachsen (2021, Kap. 7.2; S. 81ff)
Inhaltlicher Bezug:	Boden-Dauerbeobachtung (Sachsen) Agrarmeteorologisches Messnetz Sachsen Bodentemperaturen des Deutschen Wetterdienstes
IV. Technische Informationen	
Datenquelle:	LfULG/BFUL: Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF II), Agrarmeteorologischen Stationen (AMS) DWD: Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) mit Bodentemperaturmessungen
Räumliche Auflösung:	Punkthaft BDF II, Agrarmet. Stationen, DWD-Stationen
Geographische Abdeckung:	3 BDF II-Messstellen (Indikator A), 11 AMS (Indikator A und B), 18 DWD-Stationen (Indikator A und B)
Zeitliche Auflösung:	Jahresmittelwerte
Beschränkungen, Datenkosten:	<ul style="list-style-type: none"> • Datenherausgabe BDF II auf Anfrage • Daten AMS und DWD online abrufbar
Weiterentwicklung/Ausblick:	<ul style="list-style-type: none"> • Integration weiterer Standorten der bestehenden Monitoringsysteme sobald Messreihen > 20 Jahre erreicht sind • Korrektur der Grenztemperatur auf 4.5°C; Angleichung an die Landwirtschaft
V. Auswertung und Darstellung	
Kernaussage/Schlüsselsatz:	<p>A. An allen betrachteten Messstationen in Sachsen sind ansteigende Bodentemperaturen im gesamten Bodenprofil messbar. In ca. 65 % der Fälle ist dieser Anstieg innerhalb der letzten 20-30 Jahre statistisch signifikant.</p> <p>B. Ein zeitigeres Auftreten von Bodentemperaturen > 5 °C im Frühjahr ist derzeit nicht statistisch belegbar. Dagegen wurde an fast allen Stationen ein späteres Auftreten von Bodentemperaturen < 5 °C im Herbst festgestellt (durchschnittlich 8 Tage später).</p>
Ausführliche Beschreibung der Ergebnisse:	<p>A. Die Abbildung A1 zeigt die Ergebnisse der Trendanalyse der langjährigen Entwicklung von Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefenstufen am Beispiel der DWD-Station Oschatz. Dargestellt sind jeweils die Jahresmittelwerte im Messzeitraum sowie die berechnete lineare Trendabschätzung. In Abbildung A2 sind die Ergebnisse der Trendanalyse zusammengefasst für alle betrachteten Stationen dargestellt. Die Gesamtanzahl an betrachteten Stationen variiert sehr stark, da die Temperatursensoren in den verschiedenen Monitoringsystemen in unterschiedlichen Tiefen installiert wurden. Insgesamt zeigte sich, dass an 29 der betrachteten 32 Stationen ein statistisch signifikanter Anstieg der Lufttemperaturen innerhalb der letzten 20-30 Jahre (je nach Messzeitraum) zu beobachten war. Dem entsprechend wurde an allen betrachteten Stationen ein Anstieg der mittleren Jahrestemperaturen im Boden festgestellt, der an 65 % der Stationen statistisch nachweisbar war und im gesamten Tiefenprofil auftrat (siehe Beispiel in Abb. A1). Im Oberboden (5 und 20 cm Tiefe) wurde an 19 von 29 Stationen ein signifikanter positiver Trend festgestellt, im Unterboden (50 cm) an 20 von 21 Stationen und im tieferen Unterboden (100 cm) an 17 von 20 Messpunkten (Abb. 1). In sehr tiefen Bodenschichten (ca. 145 cm) gab es lediglich an zwei</p>

Stationen langfristige Messungen, von denen eine Messreihe einen signifikant positiven Trend aufwies.

B. Die Abbildungen unter B. zeigen jeweils die Zu- oder Abnahme des Überschreitungstages von 5 °C im Frühjahr (Abb. B1) bzw. des Unterschreitungstages von 5 °C im Herbst (Abb. B2). In der Auswertung eines früheren Überschreitens der Bodentemperatur 5 °C ergibt sich kein eindeutiger Trend bei den betrachteten 29 Stationen. An 17 Stationen in Sachsen war die Differenz aus Referenzzeitraum (Messbeginn bis 2013) und aktueller Dekade (2014-2023) positiv, was aktuell ein früheres Auftreten von 5 °C im Jahr anzeigt als in den 10 bis 20 Jahren zuvor. An 12 Stationen war diese Differenz jedoch negativ oder kaum von Null abweichend und deutet damit auf ein etwas späteres bzw. unverändertes Überschreitungsaufreten von 5 °C hin. Dagegen zeigt die Abbildung B2 für fast alle Stationen negative Differenzen des Unterschreitungstages von 5 °C an, was auf ein deutlich späteres Auftreten von Bodentemperaturen < 5 °C im Herbst hindeutet. An den 28 Stationen mit negativer Differenz traten Bodentemperaturen < 5 °C in der letzten Dekade demnach durchschnittlich 8 Tage später im Jahr auf als in den vorhergehenden ein bis zwei Dekaden. Der Unterschied zwischen den betrachteten Zeiträumen war an 18 Stationen statistisch signifikant.

Abbildung des Indikators im Monitoringbericht

A.

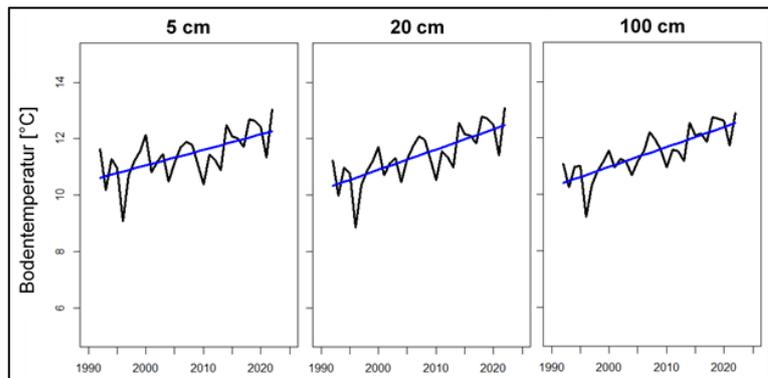


Abb. A1: Entwicklung der Bodentemperatur in 5, 20 und 100 cm Bodentiefe an der Station DWD 3811 Oschatz und lineare Trendabschätzung im Messzeitraum (blau)

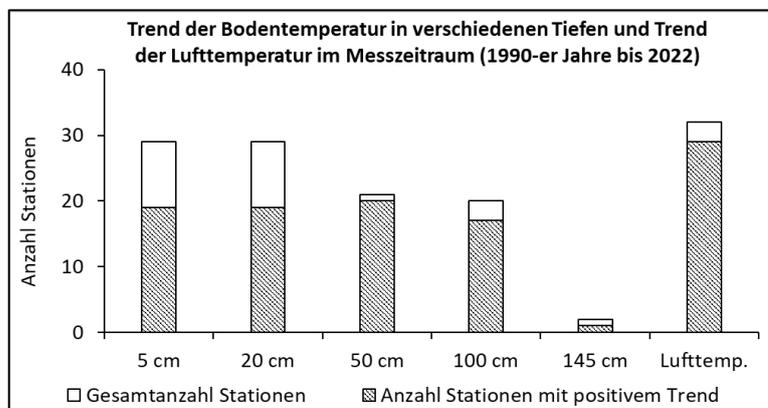


Abb. A2: Anzahl der betrachteten Stationen je Tiefenstufe insgesamt (weißer Balken) und Anzahl der Stationen mit signifikant zunehmendem Trend der Temperatur im Messzeitraum (schraffiert).

B.

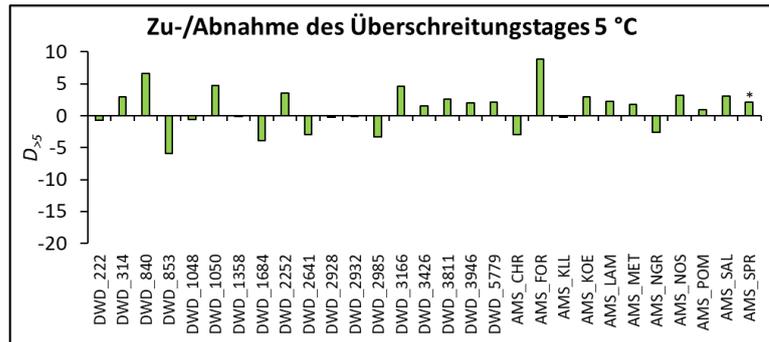


Abb. B1: Zu-/Abnahme der Differenzen $D_{>5}$ (mit $D = d_{ref} - d_{akt}$; d = Tag im Jahr, an dem 5 °C in 5 cm Bodentiefe überschritten wird, gemittelt für den Referenzzeitraum (d_{ref} : Messbeginn – 2013) und gemittelt für die letzten zehn Jahre (d_{akt} : 2014 – 2023). Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen d_{ref} und d_{akt} wurden mit * gekennzeichnet.

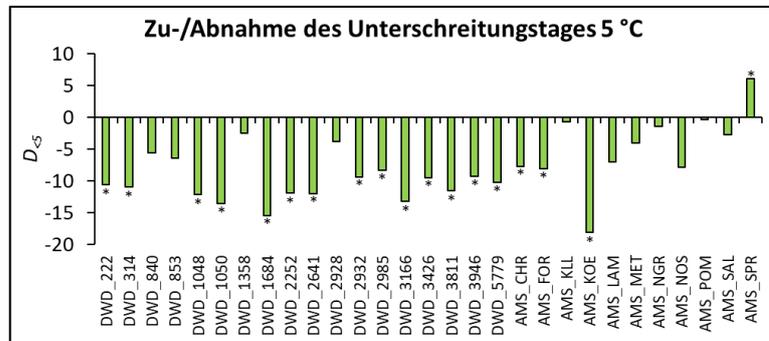


Abb. B2: Zu-/Abnahme der Differenzen $D_{<5}$ (mit $D = d_{ref} - d_{akt}$; d = Tag im Jahr, an dem 5 °C in 5 cm Bodentiefe unterschritten wird, gemittelt für den Referenzzeitraum (d_{ref} : Messbeginn – 2013) und gemittelt für die letzten zehn Jahre (d_{akt} : 2014 – 2023). Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen d_{ref} und d_{akt} wurden mit * gekennzeichnet.

Trendauswertung:

- A. An der Mehrzahl (> 65 %) der Stationen wurde ein signifikanter Anstieg der mittleren Jahrestemperaturen im Boden, sowohl im Oberboden als auch im Unterboden beobachtet. Dabei lässt sich kein räumliches Muster der Verteilung der Stationen mit positivem Trend in Sachsen erkennen.
- B. Die Überschreitung von 5 °C Bodentemperatur im Frühjahr hat sich in der letzten Dekade an 17 Stationen hin zu einer etwas früheren Überschreitung entwickelt. An einigen Stationen war ein schwach gegenteiliger Trend oder kein Trend zu erkennen. Es können hier derzeit keine eindeutigen Aussagen für Sachsen abgeleitet werden. Bei der Unterschreitung von 5 °C Bodentemperatur im Herbst scheint sich dagegen an fast allen Stationen das Auftreten geringer Bodentemperaturen hin zu einem späteren Zeitpunkt im Jahr zu entwickeln.

Weiterführende Informationen /
Literatur:

- 1) Kaspar TC, Bland EL, 1992, Soil temperature and root growth, *Soil Science* 154(4), 290-299
- 2) Onwuka BM, 2016, Effects of soil temperature on some soil properties and plant growth, *Advances in Plants & Agriculture Research* 8(1), p.34-37, DOI: 10.15406/apar.2018.08.00288
- 3) Briones MJI, Ostle NJ, McNamara NP, Poskitt J, 2009, Functional shifts of grassland soil communities in response to soil warming, *Biology & Biochemistry* 41, p.315-322, doi:10.1016/j.soilbio.2008.11.003
- 4) Toosi ER, Schmidt JP, Castellano MJ, 2014, Soil temperature is an important regulatory control on dissolved organic carbon supply and uptake of soil solution nitrate, *European Journal of Soil Biology* (61), p.68-71
- 5) Meyer M, 2019, Quantitative Bewertung von Umweltindikatoren (Sachverständigengutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes), Umweltbundesamt, <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>
- 6) Davidson E, Janssens I, 2006, Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change, *Nature* 440, 165–173, DOI: 10.1038/nature04514
- 7) Sharma PK, Kumar S, 2023, Soil Temperature and Plant Growth. In: *Soil Physical Environment and Plant Growth*, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28057-3_7