

## Trockenheit und Trockenperioden im südlichen Mitteleuropa: Zusammenhänge mit der atmosphärischen Zirkulation

Selina Thanheiser, Christoph Beck, Andreas Philipp, Jucundus Jacobeit

### Angaben zur Veröffentlichung / Publication details:

Thanheiser, Selina, Christoph Beck, Andreas Philipp, and Jucundus Jacobeit. 2024. "Trockenheit und Trockenperioden im südlichen Mitteleuropa: Zusammenhänge mit der atmosphärischen Zirkulation." In Warnsignal Klima: Herausforderung Wetterextreme; Ursachen, Auswirkungen & Handlungsoptionen, edited by José L. Lozán, Hartmut Graßl, Dieter Kasang, Markus Quante, and Jana Sillmann, 109-14. Hamburg: Universität Hamburg. <https://doi.org/10.25592/uhhfdm.16351>.

### Nutzungsbedingungen / Terms of use:

CC BY 4.0

Dieses Dokument wird unter folgenden Bedingungen zur Verfügung gestellt: / This document is made available under these conditions:

**CC-BY 4.0: Creative Commons: Namensnennung**

Weitere Informationen finden Sie unter: / For more information see:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>



## 2.9 Trockenheit und Trockenperioden im südlichen Mitteleuropa: Zusammenhänge mit der atmosphärischen Zirkulation

SELINA THANHEISER, CHRISTOPH BECK, ANDREAS PHILIPP & JUCUNDUS JACOBET

Auf der Basis gegitterter Niederschlagsdaten mit einer Auflösung von 6 km wurden für das südliche Mitteleuropa Regionen ähnlicher Niederschlagsvariabilität abgeleitet. Sie zeigen nördlich der Alpen im Sommerhalbjahr (April bis September) zwischen 1961 und 2017 eine deutliche Abnahme des Niederschlags. Südlich der Alpen ist das im Winterhalbjahr (Oktober bis März) der Fall. Tage ohne Niederschlag treten in beiden Halbjahren nahezu im gesamten Untersuchungsgebiet im Zuge des Klimawandels zunehmend häufiger auf. Um zugehörige Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation zu erfassen, wurden großräumige Zirkulationstypen mittels einer optimierten nicht-hierarchischen Clusteranalyse abgeleitet. Die Kombination aus Bodenluftdruck im Meeresniveau, relativer Luftfeuchte im 700-hPa-Niveau, der U- und V-Windkomponente im 700-hPa-Niveau, der Temperatur in 2 m Höhe sowie der regionalen Niederschlagszeitreihen erwies sich als besonders geeignet, um trockenheitsrelevante atmosphärische Zirkulationstypen zu ermitteln. Hervorzuheben sind Azorenhochkeile mit abgeschnürtem Hochdruckzentrum über dem Osten von Mitteleuropa (Sommerhalbjahr) sowie ausgedehnte Hochdruckgebiete mit Kern über dem Südosten von Europa (Winterhalbjahr). Künftige Veränderungen im Zuge des Klimawandels wurden anhand verschiedener regionaler Klimamodelle (aus Cordex und ReKliEs-De) für unterschiedliche Treibhausgasszenarien (RCP4.5 und RCP8.5) in zwei Projektionsperioden (2031-2060 und 2071-2100) untersucht. Warme trockenheitsrelevante Zirkulationstypen treten in einem künftig wärmeren Klima deutlich häufiger und persistenter auf, während die sie bestimmenden Hochdruckzentren in nordwestliche Richtung expandieren.

**Drought in southern Central Europe: Connections to the atmospheric Circulation:** Based on gridded precipitation data with a resolution of 6 km regions of similar precipitation variability were derived for southern Central Europe. Between 1961 and 2017, precipitation in the summer half-year (April to September) decreased significantly north of the Alps, in the winter half-year (October to March) south of the Alps. Days without precipitation are occurring more frequently in both seasons throughout nearly the entire study area. To investigate corresponding changes in atmospheric circulation, large-scale circulation types were derived using an optimized non-hierarchical cluster analysis. The combination of sea level pressure, relative humidity at the 700 hPa level, U and V wind components at the 700 hPa level, temperature at 2 m height and the regional precipitation time series proved to be especially suitable for generating drought-relevant atmospheric circulation types. Prominent examples are ridges from the Azores' High with a cut-off cell above eastern Central Europe (summer half-year) and extended high pressure centered above southeastern Europe (winter half-year). Future changes were analyzed using different regional climate models (from Cordex and ReKliEs-De) for different greenhouse gas scenarios (RCP4.5 and RCP8.5) in two projection periods (2031-2060 and 2071-2100). Drought-relevant circulation types with higher temperatures will occur much more frequently and persistently in a warmer climate, while their type-internal high-pressure centers will expand in a northwesterly direction.

**Sequía y períodos de sequía en el sur de Europa Central - Conexiones con la circulación atmosférica:** Se derivaron regiones de variabilidad de precipitación similar para el sur de Europa Central sobre la base de datos de precipitación en cuadrantes con una resolución de 6 km. Muestran una disminución significativa de las precipitaciones al norte de los Alpes en el semestre de verano (de abril a septiembre) entre 1961 y 2017. Al sur de los Alpes, este es el caso en el semestre de invierno (octubre a marzo). Los días sin precipitaciones son cada vez más frecuentes en ambos semestres en casi toda la zona de estudio como consecuencia del cambio climático. Para registrar los cambios asociados en la circulación atmosférica, se derivaron tipos de circulación a gran escala mediante un análisis de conglomerados no jerárquico optimizado. La combinación de la presión terrestre a nivel del mar, la humedad relativa a nivel de 700 hPa, las componentes U y V del viento a nivel de 700 hPa, la temperatura a una altura de 2 m y las series temporales de precipitación regional resultaron especialmente adecuadas para determinar los tipos de circulación atmosférica relevantes para la sequía. Destacan las altas cuñas de las Azores con un centro de altas presiones constreñido sobre el este de Europa central (semestre de verano) y extensas zonas de altas presiones con un núcleo sobre el sureste de Europa (semestre de invierno). Los cambios futuros en el curso del cambio climático se analizaron utilizando varios modelos climáticos regionales (de Cordex y ReKliEs-De) para diferentes escenarios de gases de efecto invernadero (RCP4.5 y RCP8.5) en dos periodos de proyección (2031-2060 y 2071-2100). Los tipos de circulación cálidos y relevantes para la sequía se producen con mucha mayor frecuencia y persistencia en un clima más cálido en el futuro, mientras que los centros de altas presiones que los determinan se expanden en dirección noroeste.

Die Veränderung von Extremereignissen wie Trockenperioden steht auch im Zusammenhang mit Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation. Im deutsch-österreichischen Forschungsprojekt WE-TRAX+ (LfU BAYERN 2021) wurden u.a. großräumige, trockenheitsrelevante atmosphärische Zirkulationstypen für ein Untersuchungsgebiet im südlichen Mitteleuropa abgeleitet und bezüglich von Veränderungen in Häufigkeit, Verweildauer (Persistenz) und typinternen Charakteristika untersucht.

**Daten**

Für das in Abb. 2.9-1 dargestellte Untersuchungsgebiet liegen tägliche, gegitterte Niederschlagsdaten in räumlicher Auflösung von 6km für den Zeitraum 1961-2017 vor, die von GeoSphere Austria für das Projekt WE-TRAX+ bereitgestellt wurden. Die verwendeten Reanalysedaten (JRA-55) stammen von der Japan Meteorological Agency und wurden verwendet, um bereits zu Beginn der Untersuchungen (2018) den gesamten Beobachtungszeitraum zwischen 1961 und 2017 abzudecken (KOBAYASHI et al. 2015; HARADA et al. 2016). Für Analysen in der Klimazukunft wurden Simulationen regionaler Klimamodelle der Cordex- und ReKliEs-De Initiative für unterschiedliche Treibhausgasszenarien (RCP4.5 und RCP8.5) in zwei Projektionsperioden (2031-2060 und 2071-2100) verwendet.

**Methodik**

Die Ableitung trockenheitsrelevanter atmosphärischer Zirkulationstypen kann durch den Einsatz einer opti-

mierten Zirkulationstypklassifikation erfolgen. Die cost733class software stellt einen umfassenden Katalog unterschiedlicher Klassifikationen bereit (PHILIPP et al. 2010), wobei sich für den vorliegenden Fall der SANDRA-Algorithmus (simulated annealing and diversified randomization) (PHILIPP et al. 2007) als besonders geeignet erwiesen hat. Klassifiziert wird eine Kombination aus dem Bodenluftdruck im Meeressniveau (hPa) mit der relativen Luftfeuchte im 700-hPa-Niveau, der U- und V-Windkomponente im 700-hPa-Niveau und der Temperatur in 2 m Höhe sowie den regionalen Niederschlagszeitreihen, die sich aus den gegitterten Niederschlagsdaten mittels s-modaler Hauptkomponentenanalyse erzeugen lassen (vgl. Abb. 2.9-1). Im Zuge der Optimierung ergab sich für die Klassifikationen auf Basis des Sommer- (April bis September) und Winterhalbjahres (Oktober bis März) die höchste Abbildungsleistung. Eine detaillierte Beschreibung des Optimierungsprozesses findet sich in THANHEISER (2024).

Als Schwellenwert für Trockenheit beim täglichen Niederschlag wird das 20. Perzentil des langjährigen regionalen Niederschlagsmittels im Beobachtungszeitraum herangezogen, ein häufig in der Literatur verwendeter Schwellenwert (HASLINGER et al. 2019; BUITINK et al. 2021). Ein Zirkulationstyp gilt als trockenheitsrelevant, wenn mindestens 20% seiner Auftrittstage in einer Region ähnlicher Niederschlagsvariabilität (vgl. Abb. 2.9-1) mit Trockenheit verbunden sind.

**Trockenheitstrends im südlichen Mitteleuropa**

Abb. 2.9-1 zeigt die sechs Regionen ähnlicher Niederschlagsvariabilität im Süden von Mitteleuropa, die Österreich sowie Teile Deutschlands, der Schweiz und der Tschechischen Republik umfassen. Zwischen 1961 und 2017 hat der Niederschlag im Sommerhalbjahr (April bis September) in allen Regionen nördlich der Alpen signifikant (0,05 Niveau) abgenommen (zwischen 5 und 15%), d.h. diese Abnahme kann nicht mehr als zufällig vor dem Hintergrund der Jahr-zu-Jahr-Variabilität aufgefasst werden. Südlich der Alpen ist das im Winterhalbjahr (Oktober bis März) der Fall (9% Abnahme). Die regionalen Klimamodelle zeigen für die Zukunft, dass sich der Gesamtniederschlag im Sommerhalbjahr nicht wesentlich verändert, während er im Winterhalbjahr regionenübergreifend rund 10% zunimmt. Tage mit geringen Niederschlägen unterhalb des 20. Perzentils des langjährigen regionalen Niederschlagsmittels nehmen in den letzten Jahrzehnten im Sommer- und Winterhalbjahr ab, Tage ohne Niederschlag treten jedoch in beiden Jahreszeiten signifikant häufiger auf

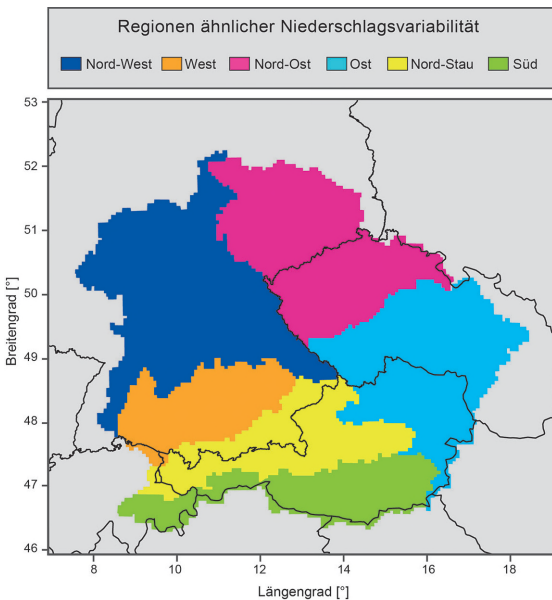


Abb. 2.9-1: Regionen ähnlicher Niederschlagsvariabilität.

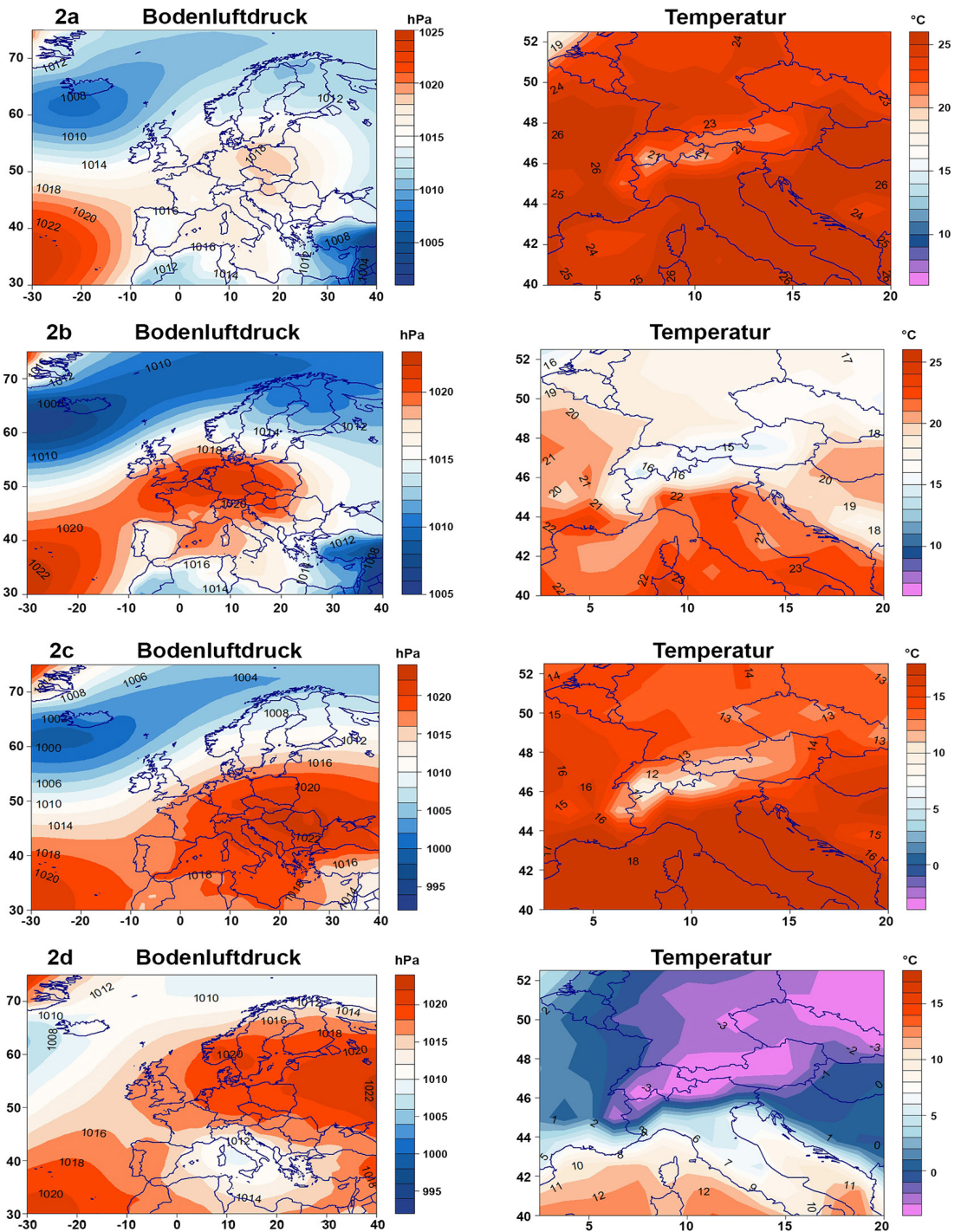


Abb. 2.9-2: Zentroide von Bodenluftdruck und Temperatur für ausgewählte trockenheitsrelevante Zirkulationstypen aus SANDRA Clusteranalysen der Variablen Bodenluftdruck im Meeresniveau, relative Luftfeuchte im 700-hPa-Niveau, U- und V-Windkomponente im 700-hPa-Niveau, Temperatur in 2 m Höhe sowie der regionalen Niederschlagszeitreihen. 2a und 2b: Sommerhalbjahr; 2c und 2d: Winterhalbjahr.

(einzige Ausnahme: Region West im Winterhalbjahr). Diese Veränderungen deuten eine Tendenz zu künftig akzentuierteren und intensiveren Niederschlägen an, die in einem wärmeren Klima aufgrund von Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation sowie der Intensivierung des globalen Wasserkreislaufs erwartet werden (GOBIET et al. 2014).

## Trockenheitsrelevante Zirkulationstypen

In Abb. 2.9-2 sind ausgewählte trockenheitsrelevante Zirkulationstypen dargestellt, beschränkt auf die Zentroide (mittlere Felder aus allen Einzeltagen des jeweiligen Zirkulationstyps) des Bodenluftdrucks im Meeresniveau und der Temperatur in 2m Höhe.

Im Sommerhalbjahr treten vermehrt schwach ausgeprägte Azorenhochkeile mit einem abgeschnürten Hochdruckzentrum über dem Osten von Mitteleuropa auf, die verbreitet mit Temperaturen um 25°C einhergehen (Abb. 2.9-2a). Eine erhöhte Verweildauer ist in den außergewöhnlich trockenen Sommern der Jahre 2003 und 2015 festzustellen. Daten des deutschen Wetterdienstes deuten darauf hin, dass dieser Zirkulationstyp auch zu den jüngsten Trockenereignissen der Jahre 2018 bis 2020 und 2022 beigetragen hat. Die regionalen Klimamodelle zeigen, dass dieser Zirkulationstyp in einem künftig wärmeren Klima zunehmend häufiger auftreten wird bei ebenfalls signifikant erhöhter Verweildauer. Ausgeprägte Hochdruckgebiete über Mitteleuropa mit Verbindung zum Azorenhoch (Abb. 2.9-2b) sind für das gesamte Untersuchungsgebiet während des Sommerhalbjahres trockenheitsrelevant. Dieser Typ mit deutlich niedrigeren Temperaturen (Abb. 2.9-2b) tritt allerdings zunehmend weniger häufig auf.

Während der Wintermonate sind v.a. ausgedehnte Hochdruckgebiete mit einem Kern über dem gesamten Südosten von Europa trockenheitsrelevant (Abb. 2.9-2c), insbesondere in den Regionen im Osten sowie

im Nordstaubereich der Alpen. Dieser Zirkulationstyp führt auch verbreitet zu anomal hohen winterlichen Temperaturen. Die Beobachtungen zeigen eine signifikante Zunahme des Zirkulationstyps zwischen 1961 und 2017, die sich in den regionalen Klimamodellen ab der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts fortsetzt. Weit nach Westen ausgedehnte Hochdruckgebiete mit Kern über Russland, die in den Wintermonaten zu trockenen und kalten Bedingungen im Norden und Osten des Untersuchungsgebiets führen (Abb. 2.9-2d), treten dagegen zunehmend seltener auf.

## Typinterne Veränderungen

Insbesondere während der Sommermonate kann eine Intensivierung der Trockenheit beobachtet werden, die generell im Zusammenhang mit einer Temperaturzunahme und Abnahme der relativen Luftfeuchtigkeit bei den trockenheitsrelevanten Zirkulationstypen steht. Die regionalen Klimamodelle zeigen in einem künftig wärmeren Klima eine Ausweitung der typinternen Hochdruckzentren in nordwestliche Richtung, wie beispielhaft in Abb. 2.9-3 dargestellt.

Aufgrund des globalen Temperaturanstiegs kommt es zur Expansion der klimatischen Tropen und dadurch zu einer polwärtigen Verlagerung des subtropisch-randtropischen Hochdruckgürtels und der angrenzenden Windsysteme (GRISE et al. 2018). Während die nördliche Ausdehnung der typinternen Hochdruckzentren mit dieser polwärtigen Verlagerung in Zusammenhang steht, kann die westliche Ausdehnung auf eine Expansion des Azorenhochs zurückgeführt werden (CRESSWELL-CLAY et al. 2022).

## Veränderung langanhaltender Trockenperioden

Eintritts- und Endtermin langanhaltender Trockenperioden basieren für jede Niederschlagsregion auf täglichen Niederschlägen unterhalb des 20. Perzentils

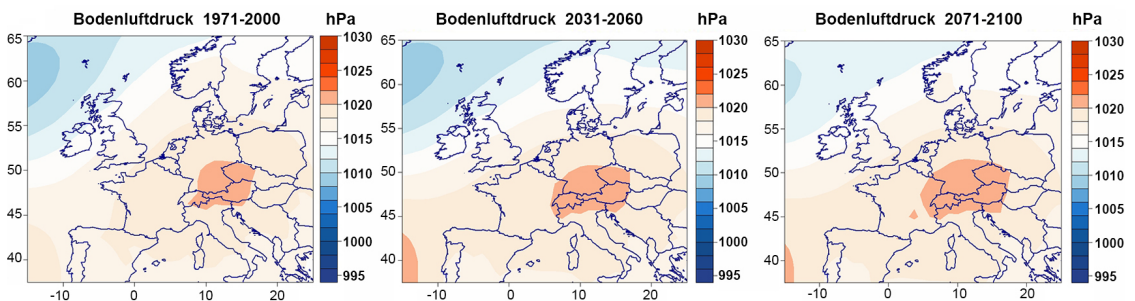


Abb. 2.9-3: Beispiel einer typinternen Veränderung eines trockenheitsrelevanten Zirkulationstyps - Hochdruckkeil von den Azoren über das südliche Großbritannien bis nach Mitteleuropa - im Sommerhalbjahr (April bis September) im regionalen Klimamodell MPI-M-MPI-ESM r1\_RCAv1. Das südmitteleuropäische Hochdruckzentrum expandiert im Vergleich zum Kontrollzeitraum (1971-2000) zunehmend in den Projektionszeiträumen (2031-2060, 2071-2100).

**Tab. 2.9-1:** Mittlere Dauer und mittlere jährliche Häufigkeit von langanhaltenden Trockenperioden in den Regionen ähnlicher Niederschlagsvariabilität sowie prozentuale Veränderung (1) zwischen den Teilzeiträumen des Beobachtungszeitraums (1961-1988, 1989-2017), (2) zwischen den Projektionsperioden (2031-2060, 2071-2100) und (3) zwischen dem Mittel der Projektionsperioden und dem Kontrollzeitraum (1971-2005). Regionales Klimamodell: MPI-MPI-ESM\_r1\_RCav für das RCP8.5 Szenario.

	Nord-West	West	Nord-Ost	Ost	Nord-Stau	Süd
<b>Mittlere Dauer in Tagen</b>						
1961-1988	75	112	92	90	82	90
1989-2017	112	114	95	110	88	105
1971-2005	113	127	107	144	138	113
2031-2060	122	122	99	128	146	160
2071-2100	122	137	121	122	144	175
(1) Veränderung (%)	+49	+2	+3	+22	+8	+17
(2) Veränderung (%)	0	+12	+23	-4	-1	+10
(3) Veränderung (%)	+8	+2	+3	-13	+5	+48
<b>Mittlere jährliche Häufigkeit</b>						
1961-1988	1,1	1,3	1,3	1,3	1,3	1,1
1989-2017	1,4	1,5	1,4	1,5	1,4	1,3
1971-2005	1,4	1,5	1,0	1,7	1,7	1,3
2031-2060	1,3	1,3	1	1,4	1,5	1,7
2071-2100	1,4	1,4	1,2	1,5	1,5	1,6
(1) Veränderung (%)	+33	+22	+3	+13	+7	+24
(2) Veränderung (%)	+3	+6	+24	+6	+2	-4
(3) Veränderung (%)	0	-9	+10	-16	-14	+23

des langjährigen, mittleren Niederschlags im Beobachtungszeitraum, erweitert um folgende Bedingung: Innerhalb der Trockenperioden mit einer Länge von mindestens einem Monat dürfen maximal zehn Tage liegen, die dem Kriterium (täglich Niederschlag < 20. Perzentil) nicht entsprechen, an welchen der Niederschlag aber noch unterhalb des 50. Perzentils liegen muss. Auf diese Weise können länger anhaltende Trockenperioden identifiziert werden und vereinzelte sommerliche konvektive Niederschlagsereignisse nicht mehr dazu führen, generell trockene Perioden auszusondern.

Als zentrales Ergebnis ist hervorzuheben, dass sich Dauer und Häufigkeit langanhaltender Trockenperioden für das in *Abb. 2.9-1* dargestellte Untersuchungsgebiet im Beobachtungszeitraum wesentlich stärker erhöht haben (17%), als es die regionalen Klimamodelle bis zum Ende des 21. Jahrhunderts projizieren (6%). *Tab. 2.9-1* zeigt die Veränderung von Dauer und Häufigkeit rezenter und künftiger Trockenperioden anhand eines ausgewählten regionalen Klimamodells (MPI-MPI-ESM\_r1\_RCav) für ein Hochemissionsszenario (RCP8.5), das die Änderungen am deutlichsten erkennbar werden lässt.

Die Dauer langanhaltender Trockenperioden stieg zwischen 1961 und 2017 im regionalen Mittel von

90 auf 104 Tage an. Am stärksten fiel der prozentuale Anstieg in der Region Nord-West aus (+49% bei der Dauer, +33% bei der Häufigkeit). In der Klimazukunft eines starken Treibhausgasszenarios (RCP8.5) kann gegenüber dem Kontrollzeitraum (1971-2005) insbesondere in der Region südlich der Alpen eine Zunahme der Dauer um fast 50% und eine Zunahme der Häufigkeit von mehr als 20% festgestellt werden. Im Verlauf des 21. Jahrhunderts zeigt die Region Nord-Ost den stärksten Anstieg bei Dauer und Häufigkeit mit jeweils mehr als 20%.

Die Analyse der atmosphärischen Zirkulation rezenter Trockenperioden zeigt im Sommer eine Zunahme schwach ausgeprägter Hochdruckkeile vom Azorenhoch mit einem abgeschnürten Hochdruckzentrum über dem Osten von Mitteleuropa sowie eine Zunahme ausgedehnter Hochdruckgebiete über Mitteleuropa. In den Wintermonaten treten großräumige Hochdruckgebiete über Mittel- bis Südeuropa sowie über Südosteuropa zunehmend häufiger während langanhaltender Trockenperioden auf. Diese Veränderungen setzen sich im Zuge des Klimawandels fort. Im Hochemissionsszenario steigt die Verweildauer dieser trockenheitsrelevanten Zirkulationstypen während langanhaltender Trockenperioden bis zum Ende des 21. Jahrhunderts

signifikant an. Generell bestehen zwischen den Szenarien keine signifikanten, sondern nur graduelle Unterschiede: So nehmen unter RCP8.5 trockenheitsrelevante Zirkulationstypen stärker zu als unter RCP4.5 und ihre zeitliche Entwicklung verläuft mit ausgeprägteren Schwankungen.

## Fazit

Die beobachteten sommerlichen Trockenheitstrends nördlich der Alpen und die winterlichen Trockenheitstrends südlich der Alpen stehen mit Veränderungen der großräumigen atmosphärischen Zirkulation in Verbindung. Im Sommerhalbjahr führt das häufigere Auftreten vom Azorenhoch abgeschnürter Hochdruckgebiete mit einem Kern über dem östlichen Mitteleuropa zu Trockenheit und langanhaltenden Trockenperioden. Im Winterhalbjahr sind vor allem großräumige Hochdruckgebiete über Mittel- bis Südeuropa sowie über Südosteuropa für zunehmende Trockenperioden verantwortlich. Im Zuge des Klimawandels ist eine Verschärfung der Trockenheit durch allgemeine Temperaturzunahme und eine Erhöhung der Auftretshäufigkeit und Verweildauer trockenheitsrelevanter Zirkulationstypen zu erwarten. Die regionalen Klimamodelle zeigen eine kontinuierliche Ausweitung der typinternen Hochdruckzentren bis zum Ende des 21. Jahrhunderts in nordwestliche Richtung. In den Wintermonaten bewirkt dies trotz projizierter Gesamtniederschlagszunahme ein häufigeres Auftreten von Trockenperioden. In den Sommermonaten zeigt sich durch die nordwestliche Ausweitung der Hochdruckzentren eine prinzipielle Verstärkung des antizyklonalen Regimes (JACOBEIT et al. 2017), die zu verschärften Trockenheitsbedingungen führt. Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation im Zuge des Klimawandels implizieren daher, dass auch das südmitteleuropäische Untersuchungsgebiet vermehrt nicht nur von Starkniederschlägen, sondern auch von Trockenheit und Trockenperioden betroffen sein wird.

**Danksagung:** Das Projekt WETRAX+ als Weiterführung des WETRAX-Projekts (*Weather Patterns, Cyclone Tracks, and Related Precipitation Extremes*) wurde gefördert vom Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (Österreich), der Bundesanstalt für Gewässerkunde (Deutschland) sowie vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz/Landesamt für Umwelt (Bayern).

## Literaturverzeichnis

- BUITINK, J., T. C. VAN HATEREN & A. J. TEULING (2021): Hydrological System Complexity Induces a Drought Frequency Paradox. In: *Frontiers in Water* 3 (640976). DOI: 10.3389/frwa.2021.640976
- CRESSWELL-CLAY, N., C. C. UMMENHOFER, D. L. THATCHER, A. D. WANAMAKER et al. (2022): Twentieth-century Azores High expansion unprecedented in the past 1,200 years. In: *Nature Geosci* 15 (7), S. 548–553. DOI: 10.1038/s41561-022-00971-w
- GOBLET, A., S. KOTLARSKI, M. BENISTON, G. HEINRICH et al. (2014): 21st century climate change in the European Alps—a review. In: *The Science of the total environment* 493, S. 1138–1151. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.07.050
- GRISE, K. M., S. M. DAVIS, P. W. STATEN & A. ORI (2018): Regional and Seasonal Characteristics of the Recent Expansion of the Tropics. In: *Journal of Climate* 31 (17), S. 6839–6856. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0060.1
- HARADA, Y., H. KAMAHORI, C. KOBAYASHI, H. ENDO et al. (2016): The JRA-55 Reanalysis: Representation of Atmospheric Circulation and Climate Variability. In: *Journal of the Meteorological Society of Japan* 94 (3), S. 269–302. DOI: 10.2151/jmsj.2016-015
- HASLINGER, K., M. HOFSTÄTTER, C. KROISLEITNER, C. SCHÖNER et al. (2019): Disentangling Drivers of Meteorological Droughts in the European Greater Alpine Region During the Last Two Centuries. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 124 (23), S. 12404–12425. DOI: 10.1029/2018JD029527
- JACOBEIT, J., M. HOMANN, A. PHILIPP & C. BECK (2017): Atmospheric circulation types and extreme areal precipitation in southern central Europe. In: *Advances in Science and Research* 14, S. 71–75. DOI: 10.5194/asr-14-71-2017
- KOBAYASHI, S., Y. OTA, Y. HARADA, A. EBITA et al. (2015): The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. In: *Journal of the Meteorological Society of Japan* 93 (1), S. 5–48. DOI: 10.2151/jmsj.2015-001
- LfU BAYERN (2021): WETRAX+ [www.lfu.bayern.de/wasser/klimawandel/wasserhaushalt/projekte/wetrax/index.htm](http://www.lfu.bayern.de/wasser/klimawandel/wasserhaushalt/projekte/wetrax/index.htm)
- PHILIPP, A., J. BARTHOLY, C. BECK, M. ERPICUM et al. (2010): Cost733cat – A database of weather and circulation type classifications. In: *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 35 (9–12), S. 360–373. DOI: 10.1016/j.pce.2009.12.010
- PHILIPP, A., P. M. DELLA-MARTA, J. JACOBEIT, D. R. FEREDAY et al. (2007): Long-Term Variability of Daily North Atlantic–European Pressure Patterns since 1850 Classified by Simulated Annealing Clustering. In: *Journal of Climate* 20 (16), S. 4065–4095. DOI: 10.1175/JCLI4175.1
- THANHEISER, S. (2024): Regionale Auswirkungen des globalen Klimawandels. Variabilität trockenheitsrelevanter atmosphärischer Zirkulationstypen und Veränderung der atmosphärischen Zirkulationsdynamik von langanhaltenden Trockenperioden im Süden von Mitteleuropa. Dissertation Universität Augsburg. <https://opus.bibliothek.uni-augsburg.de/opus4/111943>
- Kontakt:**  
Dr. Selina Thanheiser,  
Prof. Dr. Christoph Beck,  
Prof. Dr. Andreas Philipp,  
Prof. Dr. Jucundus Jacobeit,  
Institut für Geographie  
Universität Augsburg  
[jucundus.jacobeit@geo.uni-augsburg.de](mailto:jucundus.jacobeit@geo.uni-augsburg.de)

THANHEISER, S., C. BECK, A. PHILIPP & J. JACOBEIT (2024): Trockenheit und Trockenperioden im südlichen Mitteleuropa: Zusammenhänge mit der atmosphärischen Zirkulation. In: J. L. LOZÁN, H. GRAßL, D. KASANG, M. QUANTE & J. SILLMANN (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Herausforderung Wetterextreme – Ursachen, Auswirkungen & Handlungsoptionen*. S. 109–114. [www.warnsignal-klima.de](http://www.warnsignal-klima.de). DOI:10.25592/warnsignal.klima.wetterextreme.20