

Mitt. Deutsch. Dendrol. Ges. (MDDG)	109	81–98	2024	ISBN 978-3-494-01982-6
-------------------------------------	-----	-------	------	------------------------

# Erstellung einer neuen Winterhärtezonenkarte für Europa unter Berücksichtigung mesoklimatischer Effekte

ELENA WULFF und JÜRGEN BOUILLON

## Abstract

### A new plant hardiness zone map for Europe, considering mesoclimatic effects

For use in private and public spaces, plants should be adapted to the given climatic conditions, here in particular to the temperatures in the coldest season and be able to thrive permanently. Since the 19th century, plants have been assigned to temperature zones (plant hardiness zones), which provide information on the lowest winter temperatures tolerated by the respective species. With the help of plant hardiness zone maps – for the European region by the map of HEINZE & SCHREIBER (1984) – it is possible to evaluate the plant hardiness zone of a potential planting site. However, climatic changes in Europe result in the need for an update of the map. This paper presents a new plant hardiness zone map for Europe created with a geographic information system (GIS) with the current reference period 1991–2020, which for the first time separates half zones for the whole of Europe and incorporates mesoclimatic effects in the processing area. Data from 11,814 weather stations was used for this purpose. The results show a shift in the winter hardiness zone from 1951–1980 to 1991–2020 in most areas of Europe by a half-zone (+2.77 °C). To ensure an appropriate usage of the new plant hardiness zone map, a grid of the standard error of the mean is added. The grid shows possible flaws of the model due to uneven data distribution and the complexity of climatic conditions.

## Zusammenfassung

Für die Verwendung im privaten und öffentlichen Raum sollen Pflanzen den gegebenen klimatischen Verhältnissen, hier insbesondere den Temperaturen in der kältesten Jahreszeit, angepasst sein

und dauerhaft gedeihen können. Bereits seit dem 19. Jh. werden Pflanzen Temperaturbereichen (Winterhärtezonen) zugeordnet, die Auskunft darüber geben, welche winterlichen Tiefsttemperaturen von der jeweiligen Art toleriert werden. Mithilfe von Winterhärtezonenkarten – für den europäischen Raum durch die Karte von HEINZE & SCHREIBER (1984) – kann ermittelt werden, welche Winterhärtezone am potenziellen Pflanzort vorliegt. Klimaänderungen in Europa ergeben jedoch die Notwendigkeit für eine Aktualisierung der Karte. Die vorliegende Arbeit stellt eine mit einem Geoinformationssystem (GIS) erstellte neue Winterhärtezonenkarte für Europa mit der aktuellen Referenzperiode 1991–2020 vor, die erstmals ganz Europa in Halbzonenteile und im Bearbeitungsgebiet mesoklimatische Effekte berücksichtigt. Dazu wurden Daten von 11 814 Wetterstationen verwendet. Die Ergebnisse zeigen eine Verschiebung der Winterhärtezone von 1951–1980 zu 1991–2020 in den meisten Gebieten Europas um eine Halbzone (+2,77 °C). Für die korrekte Verwendung der Winterhärtezonenkarte wird zudem ein Raster des Standardfehlers ergänzt. Dieses zeigt Unsicherheiten des Modells auf, die durch eine ungleiche Datenverteilung und Komplexität des Klimaregimes in einigen Gebieten erklärt werden können.

## Gliederung

- 1 Einleitung
- 2 Abgrenzung der Winterhärtezonen
- 3 Stationsdaten
- 3.1 Bearbeitungsgebiet und Datenquellen
- 3.2 Datenaufbereitung und -ergänzung
- 4 Mesoklimatische Effekte
- 5 Interpolationsmethode

- 6 Neue Winterhärtezonen für Europa
- 6.1 Verteilung der Winterhärtezonen in Europa
- 6.2 Darstellung mesoklimatischer Effekte
- 6.3 Statistische Ungenauigkeiten
- 7 Diskussion
- Danksagung
- Quellen

## 1 Einleitung

Mit zunehmend wärmeren Temperaturen in Europa wird der Klimawandel vielschichtig diskutiert. Starkregenereignisse, Trockenperioden und resultierende Folgen wie Wassermangel oder Waldbrände fordern ihren Preis auf der ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Ebene. Die Folgen des Klimawandels im Hinblick auf Landökosysteme sind komplex und in vielen Bereichen irreversibel. Besonders herauszustellen sind die Veränderungen der Phänologie, der Ökosystemstruktur, der Vegetationsperiode sowie der Rückgang einheimischer Arten. Der Artenverlust verändert die Artenstruktur und Biodiversität, kann jedoch zum Teil durch die Einwanderung neuer Arten und die daraus resultierende Habitatverschiebung kompensiert werden (BEDNAR-FRIEDL et al. 2022). Die aus der Klimaänderung resultierenden Modifikationen und

Rückgänge von Ökosystemen wirken sich auch auf die Auswahl und Verwendung von Pflanzen im Bereich des öffentlichen und privaten Grüns aus. Die Anpassung der Pflanzenauswahl muss folglich mit der Habitatverschiebung Schritt halten können.

Als Planungsinstrument für die Verwendung von Pflanzen werden seit dem 19. Jh. sogenannte Winterhärtezonenkarten verwendet. Die Definition und Darstellung von Winterhärtezonen wurden dabei in mehreren Publikationen mit verschiedenen Ansätzen diskutiert (Abb. 1). Eine detaillierte Auflistung und Darstellung der geschichtlichen Abfolge der Erforschung von Winterhärtezonen findet sich in HEINZE & SCHREIBER (1984).

Die Winterhärte wird generell durch mehrere artspezifische, standort- und umweltbedingte Parameter definiert, wobei jedoch klimatische Bedingungen die Haupteinflussfaktoren darstellen. Trotz einiger multifaktorieller Ansätze (z. B. DRUDE 1900, OUELLET & SHERK 1967a–c), dem komplexen Phänomen der Winterhärte näher zu kommen, haben sich Winterhärtezonen, die sich an die United States Department of Agriculture (USDA) Plant Hardiness Zone Map (PHZM) (USDA 1960, in der aktuellsten Version siehe USDA-ARS 2023) anlehnen, durchgesetzt. Diese fokussiert vereinfachend einen Klimaparameter, den mehrjährigen Mittelwert der absoluten Jahrestiefstem-

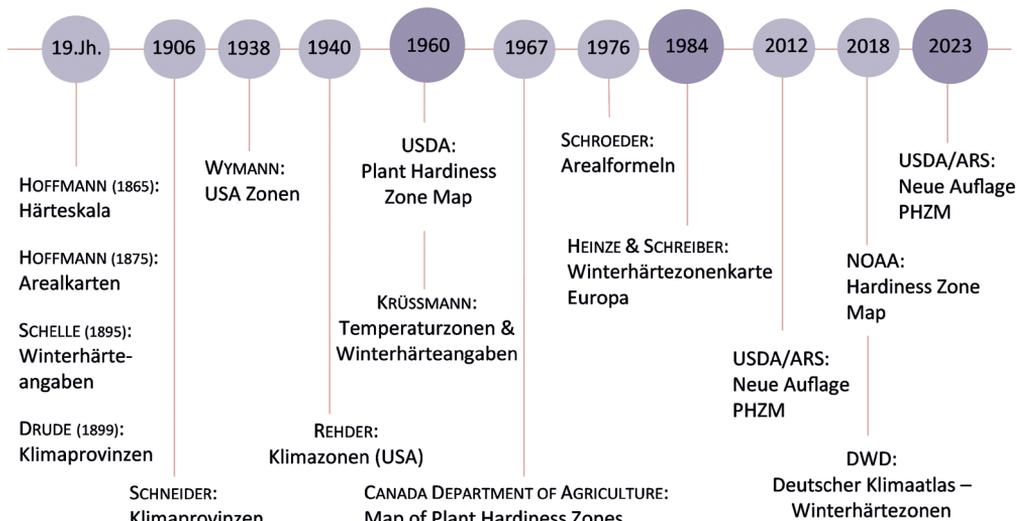


Abb. 1: Publikationen von Winterhärtezonen-einteilungen und -karten seit dem 19. Jh. Aus WULFF 2023.

peratur ( $\overline{t_{min}}$ ). Für den europäischen Raum wird seit 1984 eine Winterhärtezonenkarte von WOLDEMAR HEINZE und DETLEF SCHREIBER verwendet, veröffentlicht in Band 75 der Mitteilungen der Deutschen Dendrologischen Gesellschaft (HEINZE & SCHREIBER 1984). Deren Mittelwerte basieren auf Temperaturdaten von meteorologischen Stationen aus verschiedenen Perioden vom Anfang des 20. Jh. bis Ende der 1970er-Jahre. Die Zonen umfassen Temperaturbereiche von 5,6 °C, werden jedoch für Mitteleuropa auch in Halbzonem mit einer Temperaturspanne von 2,8 °C angegeben. Mithilfe dieser Karte kann die Anbaufähigkeit eines Gehölzes beurteilt und Kulturareale abgegrenzt werden (BÄRTELS 1991). Dafür werden die Arten denjenigen Zonen zugeordnet, in der die Pflanze keine dauerhaften Frostschäden erleidet (80%ige Überlebenswahrscheinlichkeit), bzw. die niedrigste Zone genannt, in der die Art noch gedeihen kann. In dieser Zone beginnt dann das Kulturareal für die jeweilige Pflanzenart. HEINZE & SCHREIBER (1984) ordnen den Zonen Referenzarten zu. Diese Zuordnung wurde in den Folgejahren in der dendrologischen Literatur auf nahezu das gesamte Gehölzsoriment übertragen.

Im Jahr 2012 aktualisierte das USDA zusammen mit dem Agricultural Research Service (ARS) die zu dieser Zeit verwendete PHZM von 1990 mittels eines neuen technischen und rechnerischen Ansatzes. Dieser Ansatz wurde von Forschenden der Oregon State University entwickelt und umfasst ein GIS- und statistisch gesteuertes Verfahren namens PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model). Dabei werden Besonderheiten der Topografie – wie Höhe, Neigung, vorherrschende Winde, Gewässer – in die Berechnung mit aufgenommen (DOTTLE & KOERTH 2017). Die neue PHZM verdeutlicht, dass weite Teile der USA um eine Halbzone (+2,8 °C) wärmer dargestellt werden als in der Karte von 1990. Begründet wird dies – neben der klimatischen Veränderung – durch das verbesserte technische Verfahren, den höheren physiografischen Detaillierungsgrad und umfassendere Stationsdaten (DALY et al. 2012). Ende 2023 wurde die USDA PHZM mit einem dichteren Netz an Stationen erneut aufgelegt (USDA-ARS 2023).

In einer Vorstudie (WULFF 2022) konnte eine Verschiebung der Winterhärtezonen auf der Ebene des Makroklimas auch in Europa bestätigt werden. Die Ergebnisse zeigen – ähnlich wie in den USA – eine Verschiebung der Winterhärtezone von 1951–1980 zu 1991–2020 in den meisten

Gebieten Europas um eine Halbzone (+2,77 °C). Auf eine Darstellung dieser Abweichungen wird an dieser Stelle verzichtet, da sowohl GLONING et al. (2013) als auch WULFF (2022) z.T. deutliche Abweichungen zwischen der Interpolation mit dem verwendeten E-OBS-Datensatz (s. Kapitel 3) für den Zeitraum 1951–1980 und der Karte von HEINZE & SCHREIBER (1984) feststellen konnten.

Daher sollte eine neue europäische Winterhärtezonenkarte erstellt werden, die im Vergleich zur alten Karte einen höheren Detaillierungsgrad aufweist. Denn neben makroklimatischen Verhältnissen, die die Tiefsttemperaturen in Europa und somit auch das Gedeihen einer Pflanzenart beeinflussen, spielen auch mesoklimatische Verhältnisse bei der Verbreitung von Pflanzen eine Rolle. Das Mesoklima wird von lokalen, aber auch größeren meteorologischen Prozessen beeinflusst. Viele Phänomene des Stadtklimas (z. B. Hitzeinseln), aber auch die Wirkung von Gewässern und Gebirgen können dem Mesoklima zugeordnet werden (DWD 2022). Die Auswirkungen dieser beeinflussenden Parameter auf die Winterhärtezone, sowie die Überprüfung einer Höhenabhängigkeit, sollten in der vorliegenden Arbeit näher untersucht werden. Hierfür war es erforderlich, eine passende Methode zu finden, welche die 30-jährigen Mittelwerte der Jahrestiefsttemperaturen aus 1991–2020 von europäischen Klimastationen unter Einbeziehung von mesoklimatischen Faktoren interpoliert. Die Berechnungen und Interpolation wurden in ArcGIS Pro durchgeführt (WULFF 2023). In WULFF (2022) wurden zudem einige Erkenntnisse gewonnen, wie die Verfahrensweise zur Erstellung der Karte verbessert werden kann: Dazu zählt insbesondere, dass die Anzahl und eine vollständige Datenreihe der Stationen eine erhebliche Auswirkung auf das Interpolationsergebnis haben. Da viele Stationen jedoch eine lückenhafte Datenreihe aufwiesen, sollte eine Verfahrensweise gefunden werden, wie Stationsdatenreihen zeitlich ergänzt werden können.

## 2 Abgrenzung der Winterhärtezonen

Für die Erstellung einer neuen Winterhärtezonenkarte für Europa wird der Zeitraum Januar 1991 bis Dezember 2020 betrachtet. Die Periode umfasst somit 30 Jahre und stellt die aktuelle Referenzperiode für Klimadaten dar, welche als Grundlage

für die Berechnung von Klimaprognosen verwendet wird. Die Klimareferenzperioden ermöglichen es, langfristige Entwicklungen des Klimas zu analysieren wie auch die jüngsten klimatologischen Schwankungen vollständig zu erfassen und ein klareres Bild der Rolle der vergangenen Winter für das Überleben von Pflanzen zu vermitteln.

Für die Erstellung der neuen Winterhärtezonenkarte für Europa ist das 30-jährige Mittel der jährlichen absoluten Tiefsttemperatur der zu interpolierende Parameter. Bei HEINZE & SCHREIBER (1984) wird dieser Parameter benannt als  $t_{minj}$ . Diese Schreibweise wurde für die vorliegende Arbeit übernommen. Die jährliche Tiefsttemperatur wird als  $t_{minj}$  bezeichnet.

Zur Abgrenzung der Temperaturbereiche der einzelnen Winterhärtezonen gilt Tabelle 1. Die Temperaturbereiche der Winterhärtezonen sind

**Tabelle 1:** Temperaturbereiche der Winterhärtezonen.

Zone	°C	°F
1a	-51,13 bis -48,36	-60 bis -55
1b	-48,35 bis -45,58	-55 bis -50
2a	-45,57 bis -42,80	-50 bis -45
2b	-42,79 bis -40,02	-45 bis -40
3a	-40,01 bis -37,24	-40 bis -35
3b	-37,23 bis -34,46	-35 bis -30
4a	-34,45 bis -31,68	-30 bis -25
4b	-31,67 bis -28,90	-25 bis -20
5a	-28,89 bis -26,12	-20 bis -15
5b	-26,11 bis -23,34	-15 bis -10
6a	-23,33 bis -20,56	-10 bis -5
6b	-20,55 bis -17,78	-5 bis 0
7a	-17,77 bis -15,01	0 bis +5
7b	-15,00 bis -12,23	+5 bis +10
8a	-12,22 bis -9,45	+10 bis +15
8b	-9,44 bis -6,67	+15 bis +20
9a	-6,66 bis -3,89	+20 bis +25
9b	-3,88 bis -1,12	+25 bis +30
10a	-1,11 bis +1,66	+30 bis +35
10b	+1,67 bis +4,43	+35 bis +40
11a	+ 4,44 bis +7,21	+40 bis +45
11b	+7,22 bis +9,99	+45 bis +50
12a	+10,00 bis +12,77	+50 bis +55
12b	+12,78 bis +15,55	+55 bis +60

angelehnt an die Einteilung der USDA PHZM, werden allerdings auf zwei Nachkommastellen detailliert.

### 3 Stationsdaten

#### 3.1 Bearbeitungsgebiet und Datenquellen

Für die Berechnung der Karte werden Klimadaten von einem möglichst dichten Messnetz benötigt. Die Daten wurden sowohl von nationalen meteorologischen Instituten (NMI) und staatlichen Agenturen als auch vom European Climate Assessment and Dataset (ECA&D) bereitgestellt.

Die Grenzen des Bearbeitungsgebietes im Sinne der mesoklimatischen Betrachtung werden durch das zur Verfügung stehende europäische Digitale Geländemodell (DGM) des Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) definiert. Das DGM des CLMS beschränkt sich auf 39 European-Environment-Agency-(EEA)-Länder (Abb. 2, dunkelgrau hinterlegte Länder) und umfasst damit die Kulturräume Mittel-, Nord-, West-, Süd- und Südosteuropa sowie Kleinasien (orientiert am Vorschlag des Ständigen Ausschusses für geografische Namen zur Großgliederung Europas (NORDNORDWEST 2008)).

Zur Erweiterung der neuen Winterhärtezonenkarte wird für Osteuropa sowie Nordafrika und die Levante ein europäischer, gerasterter ENSEMBLES-Datensatz (E-OBS) (Version v23.1e) des ECA&D von CORNES et al. (2018) verwendet (Abb. 2, hellgrau hinterlegte Länder), der bereits bei GLONING et al. (2013) und WULFF (2022) verwendet wurde. Der E-OBS-Datensatz liefert tägliche Klimadaten in einem Zeitraum von 1950 bis 2020 in einem Rasterformat von 0,1°. Die Datenerhebung erfolgt in erster Linie durch das Königlich Niederländische Meteorologische Institut (KNMI) (HAYLOCK et al. 2008).

#### 3.2 Datenaufbereitung und -ergänzung

Wie auch bei DALY et al. (2008) wurden nur Stationen verwendet, die in der zu betrachtenden Periode (hier 1991–2020) mindestens drei Jahre einen Jahrestiefstwert aufweisen. Nach dieser Selektion umfasst das Bearbeitungsgebiet 11 814 Stationsdaten. Die Stationsanzahl pro Land variiert dabei sehr stark in einem Spektrum zwischen 1 und

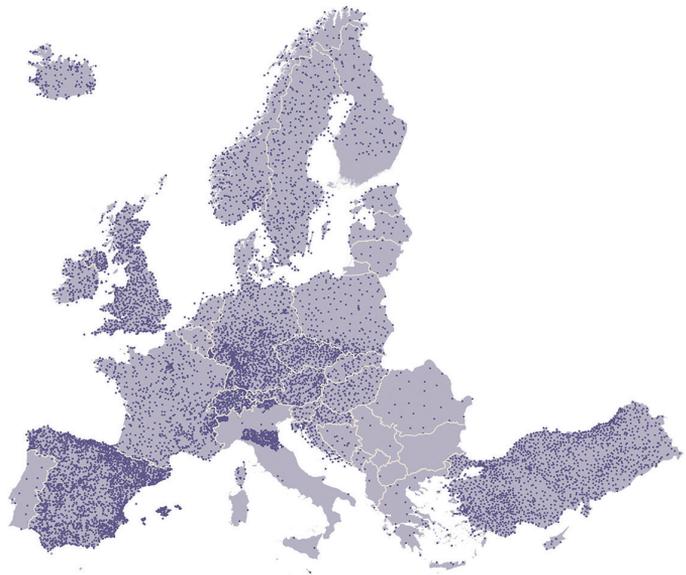
**Abb. 2:** Ausdehnung der neuen Winterhärtezonenkarte: Mittel-, Nord-, West-, Süd-, Südosteuropa und Kleinasien (Bearbeitungsgebiet, violett) mit mesoklimatischer Betrachtung; Osteuropa, Nordafrika und Levante (grau) mit makroklimatischer Betrachtung.



3 215, was zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Datenpunkte führt (Abb. 3). Für das Kosovo, Bulgarien, Monaco und den Vatikan sind keine, für Italien regional sehr wenige Stationsdaten vorhanden. Dennoch werden diese Gebiete im Interpolationsprozess durch die umliegenden Stationen

mit einbezogen, sodass sich eine lückenlose Karte ergibt. In diesen Gebieten muss jedoch beachtet werden, dass die Interpolation ungenauere Ergebnisse liefert.

Von insgesamt 11 814 Stationen weisen nur 20 % eine vollständige 30-jährige Datenreihe auf



**Abb. 3:** Klimastationen und deren Verteilung im Bearbeitungsgebiet. Aus WULFF 2023.

(2369 Stationen). 4127 Stationen (ca. 35 %) liefern Daten zwischen 29 und 15 Jahren. Die restlichen 45 % haben jährliche Daten zwischen drei und 14 Jahren (Abb. 4).

Der Umfang des Datensatzes beeinflusst die Genauigkeit der Interpolation maßgeblich, wobei mehr Daten zu präziseren Ergebnissen führen (OLIVER & WEBSTER 2014). Auch die Verteilung der Datenpunkte hat Auswirkungen auf die Interpolationsqualität. Allerdings ist die Anzahl der Klimastationen bereits festgelegt und kann nicht verändert werden. Ein weiterer Faktor ist die zeitliche Konsistenz der Daten, also das Vorhandensein lückenloser Datenreihen (RAUTHE et al. 2013).

Um diese Herausforderungen zu bewältigen, wurden drei Methoden entwickelt, um fehlende Daten in zeitlich unterbrochenen Datenreihen von Klimastationen zu ergänzen und so die zeitliche Konsistenz herzustellen. Die Methoden orientieren sich an Verfahren zur Vervollständigung lückenhafter Zeitreihen von Stationsdaten nach DALY et al. (2008). Die Methoden wurden innerhalb eines Beispielgebietes (Deutschland) getestet. Die beste Methode (geringster Mean Absolute Error) wurde anschließend für die Erstellung der neuen Winterhärtezonenkarte verwendet. Diese Methode beruht auf der Schätzung von Temperaturwerten durch Regressionsanalysen und eine anschließende Interpolation von Residuen (Abweichung eines vorhergesagten Wertes vom tatsäch-

lich beobachteten Wert) unter Berücksichtigung der Topografie. Dabei geht die Methode von einer Beziehung zwischen Tiefsttemperaturen und Geländehöhe aus. Zunächst wurde für jedes Jahr im Zeitraum 1991–2020 eine Regressionsgleichung erstellt. Dann wurde der Raum in einem festen Raster mit einem digitalen Geländemodell (DGM) versehen. Für jede Rasterzelle wurde ein Schätzwert basierend auf der Regressionsfunktion und dem Höhenwert des DGMs berechnet. Die Residuen aus der Regressionsfunktion wurden mittels Inverse Distance Weighting (IDW) auf das DGM interpoliert, um für jede Rasterzelle und Station einen Residualwert zu erhalten. Die Werte der Rasterzellen der Regressions-schätzungen und der interpolierten Residualwerte wurden addiert, um den endgültigen Schätzwert zu erhalten. Die Regressionsanalyse zeigte, dass das Verhältnis zwischen Tiefsttemperaturen und Geländehöhe je nach Region variiert. Daher wurde Europa für die Stationsreihenergänzung in verschiedene klimatisch ähnliche Gebiete unterteilt: Island, Nordeuropa, Nordosteuropa, Mitteleuropa, Westeuropa, Südwesteuropa, Süd-/Südosteuropa sowie den Alpenraum.

Die Ergänzung der Datensätze führt dazu, dass für jede Klimastation im Bearbeitungsgebiet Jahrestiefstwerte ( $t_{min}$ ) für die Jahre 1991–2020 zur Verfügung stehen. Auf Grundlage dieser Daten wurden Mittelwerte ( $\bar{t}_{min}$ ) für jede Station ermittelt, die später als abhängige Variablen für die

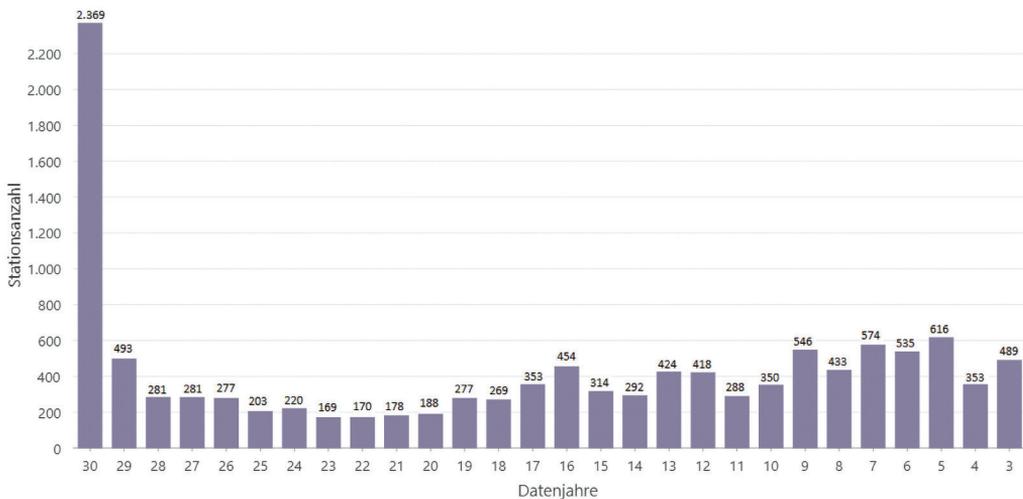
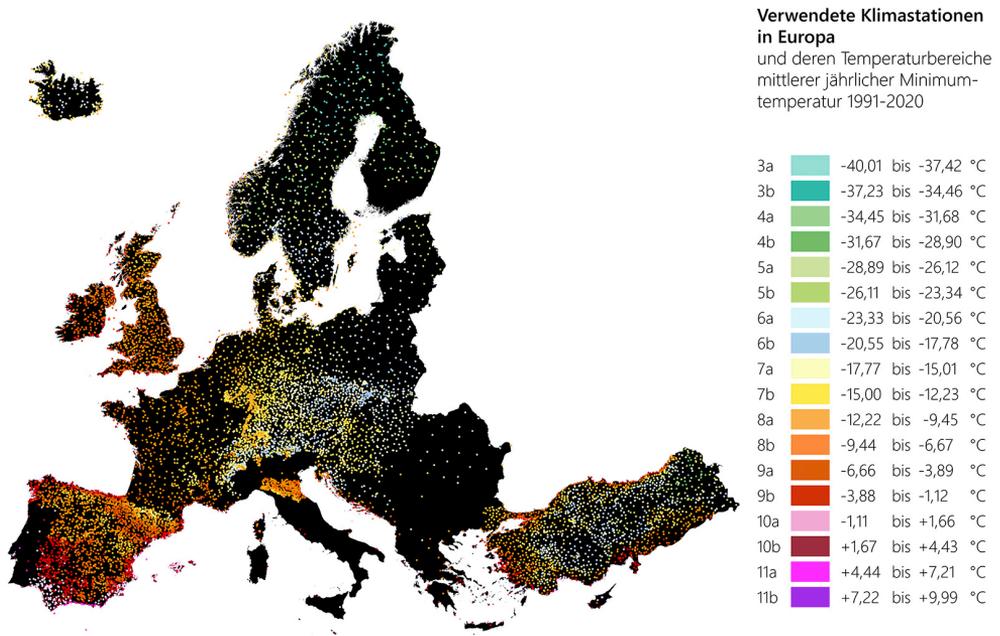


Abb. 4: Verteilung der Datenjahre von 1–30 aller Klimastationsdatenreihen. Aus WULFF 2023.

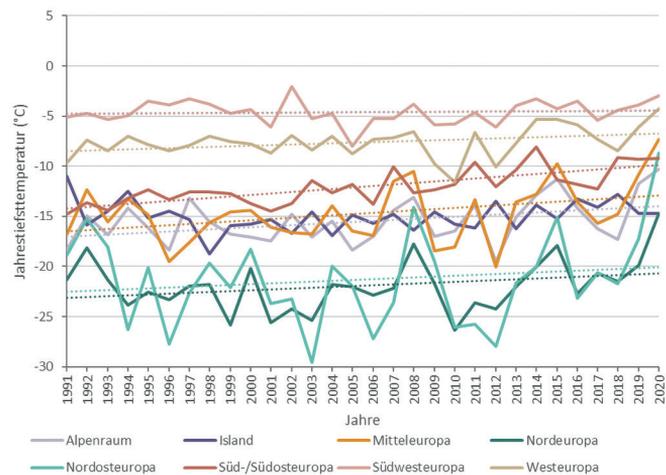


**Abb. 5:** Verwendete Klimastationen gemäß ihrer Winterhärtezone farblich kodiert. Aus WULFF 2023.

Interpolation der Karte dienen. In Abb. 5 sind alle verwendeten Klimastationen im Bearbeitungsgebiet dargestellt und nach ihrer jeweiligen Winterhärtezone farblich kodiert. Diese Winterhärtezone erstrecken sich von 3a bis 11b.

### 3.3 Trend

Aus der Datenanalyse ergibt sich ein sichtbarer Trend der Tiefsttemperaturen in Europa von 1991 bis 2020. Insbesondere in den letzten 10–15 Jahren



**Abb. 6:** Entwicklung der Jahresleiftemperaturen in klimatischen Großregionen Europas von 1991–2020. Aus WULFF 2023.

ren ist ein Trend zu wärmeren Tiefsttemperaturen festzustellen. Diese Entwicklung zeigt sich unterschiedlich stark in verschiedenen klimatischen Großregionen (Abb. 6). Die geringsten Veränderungen sind in Südwest- und Westeuropa zu beobachten, während die übrigen Gebiete einen recht ähnlich hohen Anstieg der Temperaturverläufe über die Jahre aufweisen.

#### 4 Mesoklimatische Effekte

Für die Erstellung der neuen Winterhärtezonenkarte sollen mesoklimatische Einflüsse berücksichtigt werden. Das Mesoklima beschreibt das Klima in Raumeinheiten wie beispielsweise Tälern, Städten, Küsten und Bergen sowie sowie kulturräumliche Gliederungselemente (HUPFER et al. 2005). Im Mesoklima wirken sich Wechselbeziehungen zwischen Relief, Oberflächenbedeckung, Klima und menschlicher Bebauung besonders aus (WEISCHET & ENDLICHER 2018). Die Skalen der mesoklimatischen Phänomene umfassen etwa eine horizontale Ausdehnung von ca. 1 bis 100 km (DWD 2022). Demgegenüber betrachtet das Mikroklima lokalklimatische Gegebenheiten, wie z. B. die Oberflächeneigenschaften, die Geländeform oder den Pflanzenbewuchs (DWD 2022).

Zur Abbildung mesoklimatischer Effekte in der neuen Winterhärtezonenkarte wurden eine Reihe von Klimafaktoren betrachtet. Darunter sind spezifische Merkmale zu verstehen, die die klimatischen Bedingungen an einem Ort beeinflussen. Je nach topografischer Lage dieses Ortes können sie eine sehr kleinräumige Differenzierung des Klimas bestimmen (GLASER et al. 2010). Typische Klimafaktoren sind beispielsweise die Einflüsse durch die geografische Breite, die topografische Lage, Orografie, Meeresströmungen, die Bodenart, Bodenbeschaffenheit und Bodenbedeckung, Wasserverhältnisse an der Oberfläche sowie die Bebauung (HÄCKEL 1990, KUTTLER 2009, HEINEMANN & HELBIG 2018). Die Klimafaktoren wirken in unterschiedlichen Maßstäben und können in großräumige und kleinräumige Kategorien eingeteilt werden. Geografische Klimafaktoren korrelieren somit immer mit der zu betrachtenden Größenordnung des Klimas (SCHÖNWIESE 2020).

Der Wärmehaushalt des Mesoklimas ist dabei abhängig von der Höhenlage des Geländes, der Exposition und Inklination und dem resul-

tierenden Einfallswinkel der Sonnenstrahlung (BRAND 2008). Auf die Tiefsttemperaturen wirken sich laut DALY (2006) hauptsächlich die Höhenlage, Barrieren (geländebedingte Klimaübergänge), Kaltluftseen und Küstenzonen aus (Tabelle 2).

**Tabelle 2:** Überblick über die Auswirkungen bekannter, räumlicher, klimabeeinflussender Faktoren auf die Minimaltemperatur (DALY 2006).

Faktor	Effekt auf Minimumtemperatur
Höhenlage	Allgemeine Abnahme mit der Höhe (teilweise umgekehrt durch Inversionen und Kaltluftseen)
Geländebedingte Klimaübergänge	Teilen Luftmassen, wie z. B. kontinentale und maritime Luftmassen
Kaltluftseen	Temperaturinversionen in geschützten Tälern; sogar in den Tropen vorzufinden; in höheren Breiten sehr umfangreich
Küstenzonen	Einfluss, wenn Temperaturen am Land und auf dem Meer unterschiedlich sind; große Gradienten zwischen Küsten- und Binnentemperaturen

Klimafaktoren liefern statistische Größen, die in die Berechnung der Winterhärtezonen einfließen können. Eine mesoskalige Berechnung erfordert jedoch eine explorative Geodatenanalyse, um zu verstehen, wie bestimmte Einflussfaktoren die Interpolation beeinflussen können. Diese Analyse nutzt raumbezogene statistische Methoden, um räumliche Zusammenhänge zwischen Umweltereignissen zu untersuchen. Im Gegensatz zur traditionellen Statistik bezieht die räumliche Statistik Eigenschaften wie Standort, Entfernung und Richtung in die Analyse ein, um zu beschreiben, wie Umweltphänomene im geografischen Raum verteilt sind. Ein räumliches Muster wird hierbei durch die Funktion und Beziehung zwischen einer abhängigen Variablen (hier  $\overline{t_{minj}}$ ) und mehrerer unabhängiger Variablen (hier Klimafaktoren; im Folgenden Prädiktoren) definiert. Die Beziehung der räumlichen Muster zu  $\overline{t_{minj}}$  können mittels Regressionsanalysen untersucht und modelliert werden (ZHU 2016).

Die explorativen Geodatenanalysen in der vorliegenden Arbeit wurden für folgende Klimafaktoren durchgeführt:

- Kontinentalität (Distanz zur Küstenlinie),
- Nähe zu Flüssen und größeren stehenden Gewässern > 500 km<sup>2</sup>,
- absolute Geländehöhe,
- Potenzial für die Ausbildung von Kaltluftseen (relative Geländehöhe),
- Hangneigung,
- Exposition und
- städtischer Wärmeeffekt.

Die Anwendung von Regressionsanalysen in verschiedenen europäischen Teilgebieten ermöglichte es weiterhin, den Grad der mathematischen Beschreibbarkeit der Beziehung zwischen einem Klimafaktor und den niedrigsten Temperaturen zu ermitteln.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Stärke der linearen Beziehung je nach geografischem Teilgebiet unterschiedlich war. In allen Regionen stellten die Geländehöhe und die Nähe zum Meer die signifikantesten Zusammenhänge dar. Die Prädiktoren Hangneigung und relative Geländehöhe wiesen insbesondere in topografisch anspruchsvollen Gebieten wie den Alpen eine deutliche Abhängigkeit auf. Hingegen lieferten die Exposition, die Nähe zu Flüssen und größeren stehenden Gewässern sowie der städtische Wärmeeffekt keine zufriedenstellenden Ergebnisse in der Geodatenanalyse.

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden daher die Prädiktoren **Distanz zur Küstenlinie, absolute Geländehöhe, Hangneigung und relative Geländehöhe** ausgewählt und als unabhängige Variablen in die Interpolation einbezogen. Diese Faktoren spiegeln somit effektiv die mesoklimatischen Effekte wider.

## 5 Interpolationsmethode

Die Erstellung der Winterhärtezonenkarte erfordert eine räumliche Interpolation, ein Verfahren, bei dem unbekannte Klimadaten anhand bekannter Messungen geschätzt werden. Klima- und meteorologische Daten, in dieser Arbeit als Eingabedaten verwendet, sind üblicherweise Punktstationsdaten. Die Interpolation von diesen Punktdaten auf Flächen erlaubt die Darstellung räumlicher Muster von Klimaphänomenen. Besonders die

Interpolation von klimatischen und meteorologischen Daten unter Verwendung digitaler Geländemodelle ermöglicht genaue Schätzungen der klimatischen Bedingungen in einem Gebiet, ohne auf umfangreiche Klimaaufzeichnungen angewiesen zu sein (CHAPMAN & THORNES 2003, ZHU 2016).

Für die Interpolation der neuen Winterhärtezonenkarte im Bearbeitungsgebiet wurde die Methode Empirical Bayesian Kriging (EBK) Regression Prediction gewählt (KRIVORUCHKO & GRIBOV 2019). Die Methode kombiniert Ordinary-Least-Squares-Regression (OLS) und EBK, um Vorhersagen zu erstellen. Das Prinzip beim Kriging wird dadurch bestimmt, dass Werte durch eine generelle Komponente und eine Fehlerkomponente vorhergesagt werden. OLS übernimmt hier die Modellierung der generellen Komponente, während EBK die Fehlerkomponente behandelt (ESRI 2022).

Die EBK-Regressionsvorhersage teilt die Eingabedaten in Teilmengen auf, um lokale Effekte zu berücksichtigen. Für jede Teilmenge wird ein Regressions-Kriging-Modell erstellt und eine Regressionsanalyse durchgeführt, welche dann für die Interpolation verwendet wird. Diese wird dann zusammen mit den Semivariogramm-Modellen aus EBK verwendet, um die Werte an jeder Position vorherzusagen. Dies ermöglicht die Berücksichtigung von regionalen Unterschieden, dargestellt in den Beziehungen zwischen unabhängigen Variablen und der abhängigen Variablen (ESRI 2022).

EBK Regression Prediction kann mehrere unabhängige Variablen in den Prozess einbeziehen. Diese Variablen werden durch eine Principal Component Analyse reduziert, um Multikollinearität zu verhindern. Die Hauptkomponenten dieser Variablen werden im Regressionsmodell verwendet, um die Informationen effizient zusammenzufassen (ESRI 2022).

Für die erweiterte Kartendarstellung in Nordafrika, der Levante und Osteuropa wurde der E-OBS-Datensatz mit dem Index T<sub>Nn</sub> verwendet. Dieser enthält ein multidimensionales Raster mit einer Auflösung von 0,1° (entspricht ungefähr 7 km × 11 km). Da diese T<sub>Nn</sub>-Rasterdatei jährliche Tiefsttemperaturen für den Zeitraum von 1950 bis 2020 enthält, wurde zunächst ein 30-jähriger Mittelwert für den Zeitraum vom 01.01.1991 bis zum 31.12.2020 berechnet. Diese Berechnung erfolgte mithilfe des Aggregationstools in ArcGIS Pro. Für die Darstellung der Winterhärtezonen wurde das aggregierte Raster klassifiziert. Die Klassifizierung

basierte auf den definierten Temperaturbereichen der Winterhärtezone (Tabelle 1).

## 6 Neue Winterhärtezonen für Europa

Durch die Interpolation mit EBK Regression Prediction ergibt sich im Bearbeitungsgebiet ein Raster des  $\overline{t_{\min}}$  in einer Auflösung von 600 m × 600 m unter Berücksichtigung der Mesoklimafaktoren absolute Geländehöhe, relative Geländehöhe, Küstennähe und Hangneigung. Außerhalb des Bearbeitungsgebietes in Nordafrika, der Levante und Osteuropa beläuft sich die Rasterauflösung auf 7 km × 11 km, was nur makroklimatische Aussagen ermöglicht. Die neue Winterhärtezonenkarte wird gemäß den Temperaturschwellenwerten der Winterhärtezonen klassifiziert und mit den punktuellen Stationsdaten überlagert (Abb. 5). Die Winterhärtezonen erstrecken sich nun von 2a bis 11b, was einer Temperaturspanne von -45,57 °C bis +9,99 °C entspricht (Abb. 7).

### 6.1 Verteilung der Winterhärtezonen in Europa

Nordeuropa liegt in den Zonen 2a bis 8a. Die kältesten Gebiete mit Winterhärtezone 2b sind die nördlichsten Spitzen von Finnland und Norwegen im „Kevo Strict Nature Reserve“ und der „Kaldoiivi Wilderness Area“. Die Winterhärtezone 2a findet sich dort ausschließlich auf den höchsten Lagen (745 m bis 1066 m NHN) nordwestlich von Utsjoki. Die Küsten Südnorwegens und Islands sind dagegen verhältnismäßig mild (8a). In Osteuropa kommen die Zonen 3a bis 6b vor. In Mitteleuropa finden sich die Zonen 6b bis 8b, mit Ausnahme des Baltikums mit den Zonen 5b bis 7a und dem Alpenraum. Dort reichen die Winterhärtezonen von 4b bis 7b.

Westeuropa zeigt mildere Zonen von 7b bis 9b, Südeuropa liegt in den Zonen von 7b bis 11b und Südosteuropa in den Zonen 4a (in den Karpaten) bis 10b. Die wärmsten Winterhärtezonen erstrecken sich von Portugal über Südspanien, Sizilien, die Balearischen Inseln, Malta, Zypern und die griechischen Inseln sowie Nordafrika mit Zonen von 10a bis 11b. Die Zone 11a ist an der südspanischen Küste zwischen Almeria und Malaga und die Zone 11b ausschließlich in Lissabon und Faro zu finden.

### 6.2 Darstellung mesoklimatischer Effekte

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit bestand darin, mesoklimatische Effekte in ganz Europa bei der Interpolation der Winterhärtezonen zu berücksichtigen, um eine erkennbare Staffelung und Gliederung basierend auf lokalen Gegebenheiten zu erzeugen. Die Höhenstaffelung ist besonders in komplexem Gelände deutlich sichtbar. Die Einbeziehung von absoluter Geländehöhe, relativer Geländehöhe und Hangneigung führt zu detaillierteren Darstellungen der gestuften Zonierung in Gebirgsregionen wie den Alpen (Abb. 8), Pyrenäen, Karpaten und Skanden.

Die Auswirkungen von **Ozeanität** und **Kontinentalität** werden durch die Einbeziehung der Küstennähe in ganz Europa deutlich. In Regionen entlang der Küstenlinie sind wärmere Winterhärtezonen im Vergleich zum Landesinneren erkennbar, wobei die Ausprägung des Küsteneffekts von Region zu Region variiert. Insbesondere auf Inseln ist eine ausgeprägte warme Zonierung zu erwarten. So ist die Insel Helgoland mit Zone 9a der wintermildeste Ort Deutschlands, wo es ansonsten eine klare Nordwest-Südost-Abfolge von Zone 8b bis Zone 7a gibt, die nur durch kühlere Mittelgebirgslagen und den Alpenrand modifiziert wird. In Norwegen ist die Ozeanität ebenfalls durch klare Zonenänderungen gekennzeichnet, oft auf kurzen Entfernungen von Zone 8b bis 3b. Auch hier werden diese Effekte jedoch stark durch die Geländehöhe modifiziert. Ähnliche Abfolgen sind in den Baltischen Staaten aufgrund der Küstennähe zu beobachten.

**Kaltluftseen** werden durch die Interpolation unter Verwendung von absoluter und relativer Geländehöhe in einigen Fällen gut dargestellt. Beispiele sind La Chaux-d'Abel in der Schweiz und die Senke Combe des Amburnex im Waadtländer Jura. Dagegen ist der Kaltluftsee von La Brévine im Neuenburger Jura in seiner Ausdehnung, die nur 1 km × 2 km betragen sollte (VOGT o. J.), zu groß dargestellt. Dies kann mehrere Gründe haben, u. a. zu geringe Stationsanzahl, fehlerhaftes DGM, nicht passende Einstellungen im Interpolationsprozess oder zu großer Unterschied der Station La Brévine (Zone 4b) im Vergleich zu den umliegenden Stationen (Zone 6b).

**Wärmere Südänge** in hügeligem Gelände werden auch nicht ausreichend in der Winterhärtezonenkarte berücksichtigt. Dies betrifft beispielsweise den Südhang des Leithagebirges am

**Winterhärtezonen in Europa**  
und deren Temperaturbereiche  
mittlerer jährlicher Minimum-  
temperatur 1991–2020

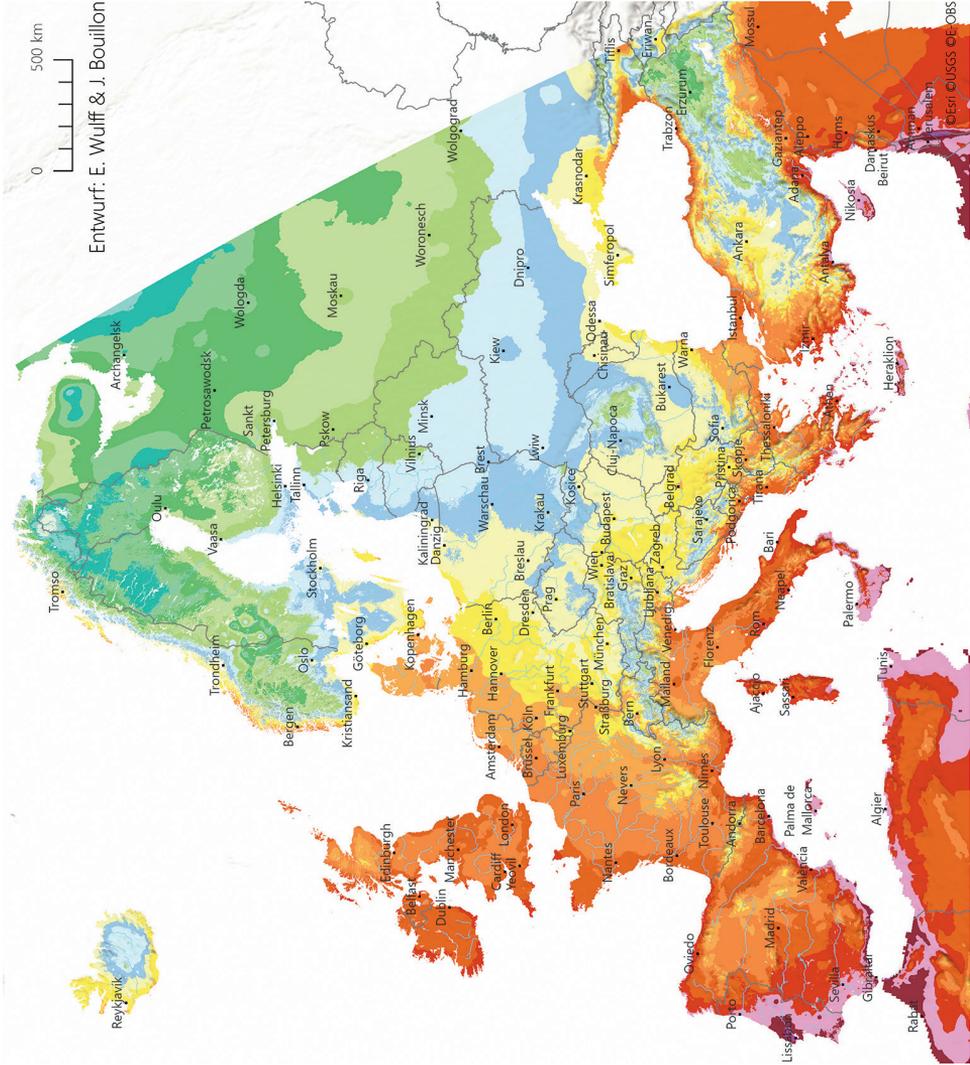
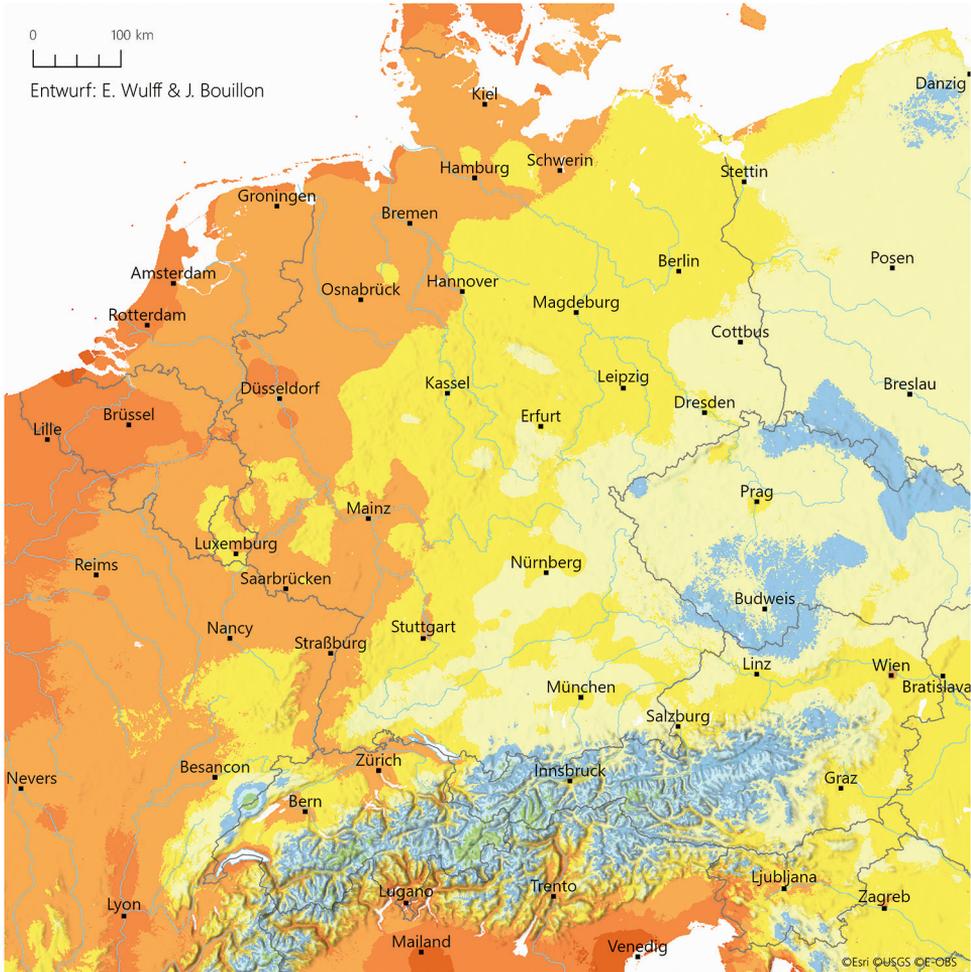


Abb. 7: Neue Winterhärtezonen für Europa für den Zeitraum 1991–2020.



### Winterhärtezonen in Mitteleuropa

und deren Temperaturbereiche mittlerer jährlicher Minimumtemperatur 1991-2020

4b	-31,67 bis -28,90 °C	6a	-23,33 bis -20,56 °C	8a	-12,22 bis -9,45 °C
5a	-28,89 bis -26,12 °C	6b	-20,55 bis -17,78 °C	8b	-9,44 bis -6,67 °C
5b	-26,11 bis -23,34 °C	7a	-17,77 bis -15,01 °C	9a	-6,66 bis -3,89 °C
		7b	-15,00 bis -12,23 °C		

**Abb. 8:** Neue Winterhärtezonen für das westliche Mitteleuropa im Zeitraum 1991–2020.

Neusiedler See in Österreich. Hier befinden sich aufgrund des pannonischen Klimas und der windgeschützten Lagen reich strukturierte Weingärten, Trockenrasen, und Streuobstkulturen (WÜRFLEINER et al. 2022). Der Südhang des Leithagebir-

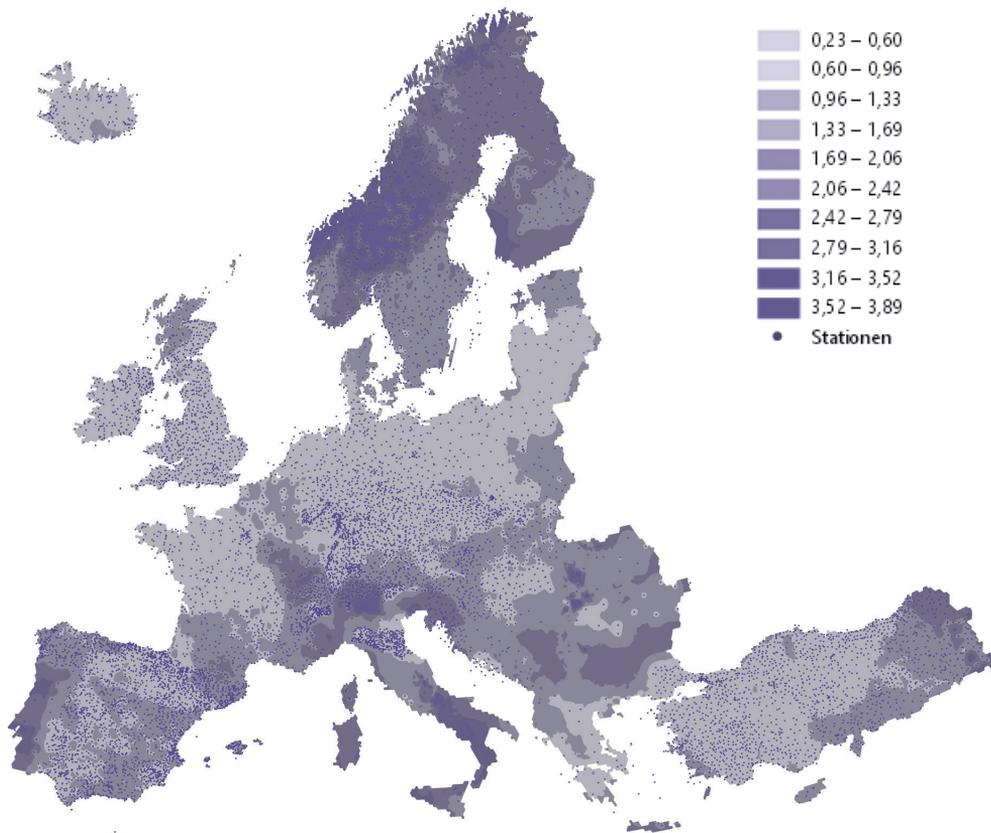
ges ist zum größten Teil mit wärmeliebenden Eichenwäldern (*Quercion pubescenti-petraeae*) und Eichen-Hainbuchenwäldern (*Carpinion betuli*) bedeckt (FALLY & FISCHER 2015). Trotz höherer Stationsdichte und Einbeziehung der Hangnei-

gung innerhalb der Interpolation wird das Gebiet südlich des Leithagebirges der Zone 7b zugeordnet und stellt im Vergleich zur Umgebung keine warme Exklave dar, obwohl die Stationen selbst Werte der Zone 8a aufweisen.

**Flüsse** können die Temperatur eines Gebiets beeinflussen. Große, nicht zugefrorene Flüsse erzeugen bei kaltem Winterwetter durch ihr wärmeres Wasser Luftwärme, aber auch Seerauch und Talnebel. Dies trägt dazu bei, die weitere Abkühlung durch Ausstrahlung zu reduzieren. Darüber hinaus können enge Täler stadtbedingte Erwärmung und Luftverschmutzung länger speichern. Trotzdem können Täler auch Kaltluftseen beherbergen, was bedeutet, dass es innerhalb eines Flusssystemes kalte und warme Talabschnitte geben kann (HEINZE & SCHREIBER 1984). Beispiele für wärmere Zonen im Vergleich zur Umgebung sind am Neckar zu

erkennen, wo der Flussverlauf die Zone 8a deutlich zeigt, aber kein durchgehender Verlauf bis zum Rhein vorhanden ist. Ähnliche wärmere Talverläufe sind an der Donau zwischen Passau und Linz (Zone 7b), an der Elbe bei Dresden, am Main zwischen Miltenberg und Aschaffenburg, in Norditalien an der Etsch zwischen Bozen und Meran sowie in Frankreich an der Garonne zwischen Langon und Montauban zu erkennen. Die bei HEINZE & SCHREIBER (1984) dargestellten Wärmeinseln an Mittel- und Oberrhein bei Koblenz, Mainz, Worms und Ludwigshafen zeichnen sich mit dem aktuellen Modell (noch) nicht wieder ab.

Ebenfalls nur unzureichend lassen sich **städtische Wärmeinseln** identifizieren. Nur durch die Überlagerung mit den echten Stationsdaten treten bei einzelnen städtischen Stationen wärmere Verhältnisse als im Umland zutage. In Zone 7b sind



**Abb. 9:** Standardfehler des Interpolationsmodells. Aus WULFF 2023.

es im deutschsprachigen Raum die 8a-Exklaven Berlin, Braunschweig, Hildesheim und München sowie Innsbruck, in der Zone 8a die 8b-Exklaven Frankfurt am Main und Konstanz. Lediglich Wien stellt eine größere Wärmeinsel dar (Zone 8a).

### 6.3 Statistische Ungenauigkeiten

Jede Interpolationsmethode ist mit inhärenten Unsicherheiten verbunden, da sie auf einer mathematischen Annäherung an die Verteilung einer Variablen in einem geografischen Gebiet basiert und auf diskreten Punktinformationen beruht. Die Kreuzvalidierung der erstellten europäischen Karte ergab durchschnittliche Mean Absolute Errors (MAE) von 0,93 °C und Root-Mean-Square Errors (RMSE) von 1,399 °C, was im Allgemeinen als ein gutes Ergebnis betrachtet wird. Zum Vergleich: Die USDA PHZM von 2012 wies durchschnittliche MAE-Werte von 1,1 °C auf.

Die höchsten MAE-Werte, im Bereich von 2,2 °C bis 3,1 °C wurden in Regionen wie Skandinavien, dem Nordosten der Türkei und den Alpenregionen von Italien und der Schweiz festgestellt. Dies ist auf die topografische Komplexität und die vielfältigen klimatischen Bedingungen in diesen Gebieten zurückzuführen. Die niedrigsten MAE-Werte, im Bereich von 0,2 °C bis 0,4 °C, traten hingegen in Regionen wie Nordwestdeutschland, Großbritannien, Irland und Norditalien auf.

Die Gesamtverzerrungen des Modells, gemessen durch den Mean Error und den Mean Standardized Error, lagen nahe Null, was darauf hindeutet, dass keine systematische Über- oder Unterschätzung der Vorhersagen vorlag. Weitere statistische Kennzahlen näherten sich ebenfalls den optimalen Gütekriterien an.

Der Standardfehler, der die Unsicherheit des Modells im EBK Regression Prediction-Verfahren darstellt, zeigt eine beträchtliche Variation (Abb. 9). Hohe Standardfehler traten in Nordeuropa, der Türkei, Süditalien, Portugal und den Alpenregionen auf, was hauptsächlich auf komplexe Geländemuster und eine geringe Stationsdichte in diesen Regionen zurückzuführen ist. Im Gegensatz dazu wiesen Mitteleuropa, Großbritannien, Island, Nordwestfrankreich und der Westen der Türkei die geringsten Standardfehler auf.

## 7 Diskussion

Durch die Datenaufbereitung konnten fehlende Stationsdaten mit hoher Genauigkeit ergänzt werden. Das Manko in dem Modell ist die in einigen Regionen vorhandene geringe Stationsdichte oder sogar vollständig fehlende Stationsdaten in einigen Bereichen Europas. Gerade Portugal, Italien und Südosteuropa sollten noch weiter erschlossen werden. Möglicherweise existieren dort regionale, institutionelle Wetterstationen, z. B. in Anlehnung an die Agrarmeteorologie, die im Rahmen der Arbeit nicht erschlossen werden konnten.

Es konnten nur wenige städtische Wärmeinseln identifiziert werden. Das bedeutet allerdings nicht, dass (Innen-)Städte nicht wärmer sind als ihr Umland. Gründe hierfür könnten sein, dass einerseits die Temperaturspanne einer Halbzone (bis zu +2,8 °C) nicht übersprungen wird und andererseits die Mehrzahl der Klimastationen in (Groß-) Städten nicht in den Innenstädten, sondern eher in den Randbereichen liegen. Durch die Einbeziehung institutioneller und privater Wetterstationen könnten hier genauere Aussagen möglich sein.

Die methodisch nicht nachweisbaren Einflüsse der Exposition widersprechen gärtnerischen Erfahrungswerten. Warme Südhänge gelten generell als milder als Kuppen oder Tallagen, weil die Kaltluft abfließen und sie sich schneller erwärmen können. Möglicherweise handelt es sich aber hierbei doch nur um mikroklimatische Effekte, die mit dem Modell im 600 m × 600 m Raster nicht erfasst werden konnten. Eine Wechselwirkung mit der Landnutzung (Wald, Hecken, Grünland, Acker, Bebauung) würde zudem zu lokal sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen. Eine Verfeinerung des Rasters könnte hier vielleicht zu detaillierteren Ergebnissen führen. Es besteht allerdings die Gefahr eines „Flickenteppichs“, der den Begriff der Winterhärte-„Zone“ ad absurdum führt und eine Scheingenauigkeit suggeriert, die weder räumlich noch zeitlich garantiert werden kann. Lokal werden daher gärtnerische Erfahrungen weiter wichtig sein, um den rechten Platz für die rechte Pflanze zu finden.

Mit der neuen Winterhärtezonenkarte von Europa ergibt sich die Chance für eine Revidierung der Zuordnung der Gehölze zu den Winterhärtezonen. Diese Zuordnung wurde v. a. in den 1980er- und 1990er-Jahren v. a. durch ANDREAS BÄRTELS vorgenommen. Seitdem haben sich die Klimaverhältnisse geändert, Gehölze wurden be-

wusst oder unbewusst ihrer Winterhärtezonenzuordnung verwendet und haben sich möglicherweise an Standorten bewährt, die nach der bisherigen WHZ-Karte nicht geeignet wären. Zudem ist die neue Winterhärtezonenkarte deutlich genauer als die alte von HEINZE & SCHREIBER (1984).

Eine Übertragung auf Stauden hat sich in den vergangenen vier Jahrzehnten in der gärtnerischen Literatur eingebürgert. Aufgrund der komplexen Einflüsse des Winters auf die Pflanzen (BOUILLON 2001) und die ebenso komplexen Reaktionen der Pflanzen – z. T. bedingt durch ihre Herkünfte – auf diese Einflüsse kann nicht garantiert werden, dass die Methode auf alle Stauden übertragbar ist. Aber da die Zuordnung der Gehölze ebenfalls nur mit einer 80%igen Überlebenswahrscheinlichkeit einhergeht, sollte dies für Stauden auch ausreichend sein.

Ob grundsätzlich mehrere Klimafaktoren in die Abgrenzung von Winterhärtezonen einbezogen werden sollten, wie es bereits DRUDE (1900) vorgeschlagen hat, kann für künftige Arbeiten in Erwägung gezogen werden. In der vorliegenden Arbeit sollte die vorhandene Winterhärtezonenkarte aktualisiert und detailliert, aber nicht deren Methode infrage gestellt werden. Eine ausführliche Diskussion, ob der mehrjährige Mittelwert der absoluten Jahrestiefsttemperatur ( $\overline{t_{min}}$ ) ein geeigneter Kennwert ist, führen bereits HEINZE & SCHREIBER (1984: 32ff.). In Europa und den USA hat sich dieser Parameter in Verbindung mit der 80%igen Überlebenswahrscheinlichkeit der Gehölze bewährt. Zwar ist zu erwarten, dass in Europa die Spätfrostgefahr im Zuge des Klimawandels zunimmt. Ob in diesem Zusammenhang und bei den sehr unterschiedlichen Reaktionen der Pflanzen auf die Einflüsse des Winters eine multifaktorielle Betrachtung wirklich zu verlässlicheren Ergebnissen führt, bleibt zweifelhaft. Wichtiger erscheint es, das Stationsnetz zu verdichten.

Die vorliegende Arbeit stellt eine neue Winterhärtezonenkarte für Europa mit der aktuellen Referenzperiode 1991–2020 vor, die erstmals ganz Europa in Halbzonen unterteilt und im Bearbeitungsgebiet mesoklimatische Effekte berücksichtigt und nur wenige Unsicherheiten enthält. Aufgrund des Trends steigender Jahrestiefsttemperaturen (Abb. 6) empfiehlt sich eine Aktualisierung der neuen Winterhärtezonenkarte nach 10, spätestens jedoch nach 20 Jahren. Sie stellt zudem keinen Ersatz für gute Pflanzen- und Standortkenntnisse dar.

## Danksagung

Ohne die breite Unterstützung und Hilfsbereitschaft zahlreicher Personen und Institute hätte die vorliegende Arbeit nicht erstellt werden können. Wir danken insbesondere LOTHAR ULFERTS und Dr. HANS-GEORG SCHÖN, Hochschule Osnabrück, Prof. Dr. DIRK SCHINDLER, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, und zahlreichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Esri Deutschland GmbH, Esri Schweiz AG und Esri USA. Wir danken ebenso für den E-OBS-Datensatz des COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE (C3S, <https://surfobs.climate.copernicus.eu>) und den Datenlieferanten im ECA&D-Projekt (<https://www.ecad.eu>) (CORNES et al. 2018).

Außerdem danken wir den folgenden Nationalen Meteorologischen Instituten und staatlichen Agenturen für die Bereitstellung der Klimastationsdaten: Agencia Estatal de Meteorología, Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Centro Funzionale Regionale Regione Autonoma Valle D'aosta, Czech Hydrometeorological Institut, Danmarks Meteorologiske Institut, Deutscher Wetterdienst, Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinhessen-Nahe-Hunsrück, Estonian Environment Agency, ECA&D (Royal Netherlands Meteorological Institute), Federal Hydrometeorological Institute, Finnish Meteorological Institute, Icelandic Meteorological Office, Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Hellenic National Meteorological Service, Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, Hungarian Meteorological Service, Hydrometeorological Service of Montenegro, Königliches Meteorologisches Institut, Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen, Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, Latvian Environment, Geology and Meteorology Centre, Le Gouvernement Du Grand-Duché De Luxembourg, Malta Airport Meteo Office, National Meteorological Administration Romania, National Institute of Meteorology and Hydrology, Met Éireann, Météo-France, Meteorology Office – Slovenian Environment Agency, Meteorological and Hydrological Service Croatia, Norwegian Meteorological Institute, Royal Netherlands Meteorological Institute, Sächsisches Landesamt für Umwelt Landwirtschaft und Geologie, Slovak Hydrometeorological Institute, State Hydrological

and Meteorological Service Poland, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum, Turkish State Meteorological Service, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik.

## Literatur

- BÄRTELS, A. (1991): Gartengehölze. Bäume und Sträucher für mitteleuropäische und mediterrane Gärten. Ulmer, Stuttgart.
- BEDNAR-FRIEDL, B.; BIESBROEK, R.; SCHMIDT, D. N.; ALEXANDER, P.; BØRSHEIM, K. Y.; CARNICER, J.; GEORGOPOULOU, E.; HAASNOOT, M.; LE COZANET, G.; LIONELLO, P.; LIPKA, O.; MÖLLMANN, C.; MUCCIONE, V.; MUSTONEN, T.; PIEPENBURG, D.; WHITMARSH, L. (2022): Europe. In: PÖRTNER, H.-O. et al. (Hrsg.): *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: 1817–1927*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- BOUILLON, J. (2001): Dendrologische Betrachtungen zu Sempervirenz, Winterhärte und Verwendbarkeit wintergrüner und immergrüner Laubgehölze. *Mitt. Deutsch. Dendrol. Ges.* 86: 27–46.
- BRAND, S. (2008): *Das Meso- und Mikroklima. Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Geographisches Institut*. <https://homepages.uni-tuebingen.de/stefan.klotz/seiten/Klimawandel/S.Brand.pdf>, Zugriff 10.10.2023.
- CHAPMAN, L.; THORNES, J. E. (2003): The use of geographical information systems in climatology and meteorology. *Progress in Physical Geography* 27 (3): 313–330.
- DALY, C. (2006): Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets. *International Journal of Climatology* 26 (6): 707–721.
- DALY, C.; HALBLEIB, M.; SMITH, J. I.; GIBSON, W. P.; DOGGETT, M. K.; TAYLOR, G. H.; CURTIS, J.; PASTERIS, P. (2008): Physiographically sensitive mapping of climatological temperature and precipitation across the conterminous United States. *International Journal of Climatology* 28 (15): 2031–2064.
- DALY, C., WIDRLECHNER, M. P., HALBLEIB, M. D., SMITH, J. I. & GIBSON, W. P. (2012): Development of a New USDA Plant Hardiness Zone Map for the United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51 (2): 242–264.
- DOTTLE, R.; KOERTH, M. (2017): Two Government Agencies. Two Different Climate Maps. *FiveThirtyEight*. ABC News. <https://fivethirtyeight.com/features/two-government-agencies-two-different-climate-maps/>, Zugriff 18.10.2023.
- DRUDE, O. (1900): Untersuchungen über klimatische Grenzen exotischer Bäume in Deutschland. *Mitt. Deutsch. Dendrol. Ges.* 9: 48–56.
- DWD [DEUTSCHER WETTERDIENST] (2022): *Wetter- und Klimalexikon*. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101640&lv3=101726>, Zugriff 10.10.2023.
- ESRI (2022): *ArcGIS Pro Hilfe*. <https://pro.arcgis.com/de/pro-app/2.8/help/main/welcome-to-the-arcgis-pro-app-help.htm>, Zugriff 13.12.2022.
- FALLY, J.; FISCHER, M. A. (2015): Nordöstliches Leithagebirge. <http://burgenlandflora.at/schutzgebiet/nordostliches-leithagebirge/>, Zugriff 10.12.2022.
- GLASER, R.; HAUTER, C.; FAUST, D.; GLAWION, R.; SAURER, H.; SCHULTE, A.; SUDHAUS, D. (2010): *Physische Geographie kompakt*. Spektrum Akad. Verl., Heidelberg.
- GLONING, P.; ESTRELLA, N.; MENZEL, A. (2013): The impacts of climate change on the winter hardiness zones of woody plants in Europe. *Theor Appl Climatol* 113 (3–4): 683–695. DOI: 10.1007/s00704-012-0817-5.
- HÄCKEL, H. (1990): *Meteorologie*. UTB 1338. Ulmer, Stuttgart.
- HAYLOCK, M. R.; HOFSTRA, N.; KLEIN TANK, A. M. G.; KLOK, E. J.; JONES, P. D.; NEW, M. (2008): A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *J. Geophys. Res.* 113 (D20). DOI:10.1029/2008JD010201.
- HEINEMANN, G.; HELBIG, A. (2018): *Klimatologie des Naturparks Saar – Hunsrück*. Umweltmeteorologie Universität Trier.
- HEINZE, W.; SCHREIBER, D. (1984): Eine neue Kartierung der Winterhärtezonen für Gehölze in Mitteleuropa. *Mitt. Deutsch. Dendrol. Ges.* 75: 11–56.
- HUPFER, P.; KUTTLER, W.; CHMIELEWSKI, F.-M.; PETHE, H. (2005): *Witterung und Klima. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- KRIVORUCHKO, K.; GRIBOV, A. (2019): Evaluation of empirical Bayesian kriging. *Spatial Statistics* 32: 100368.
- KUTTLER, W. (2009): *Klimatologie*. UTB 3099, Ferdinand Schöningh, Paderborn.

- NORDNORDWEST (2008): File:Grossgliederung Europas.png. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Grossgliederung\\_Europas.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Grossgliederung_Europas.png), Zugriff 19.10.2023.
- OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. (2014): A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *CATENA* 113: 56–69.
- OUELLET, C. E.; SHERK, L. C. (1967a): Woody Ornamental Plant Zonation: I. Indices of Winterhardiness. *Canadian Journal of Plant Science* 47 (3): 231–238. <https://cdnsiencepub.com/doi/pdf/10.4141/cjps67-044>, Zugriff 20.10.2023.
- OUELLET, C. E.; SHERK, L. C. (1967b): Woody Ornamental Plant Zonation: II. Suitability Indices of Localities. *Canadian Journal of Plant Science* 47 (4): 339–349. <https://cdnsiencepub.com/doi/pdf/10.4141/cjps67-064>, Zugriff 20.10.2023.
- OUELLET, C. E.; SHERK, L. C. (1967c): Woody Ornamental Plant Zonation: III. Suitability Map for the Probable Winter Survival of Ornamental Trees and Shrubs. <https://cdnsiencepub.com/doi/pdf/10.4141/cjps67-065>, Zugriff 20.10.2023.
- RAUTHE, M.; STEINER, H.; RIEDIGER, U.; MAZURKIEWICZ, A.; GRATZKI, A. (2013): A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). *Meteorologische Zeitschrift* 22 (3): 235–256.
- SCHÖNWIESE, C.-D. (2020): *Klimatologie. Grundlagen, Entwicklungen und Perspektiven*. UTB 1793. Ulmer, Stuttgart.
- USDA [UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE] (1960): *Plant Hardiness Zone Map for the United States*. USDA Misc. Publ. 814.
- USDA-ARS [UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE] (2023): *2023 USDA Plant Hardiness Zone Map*. <https://planthardiness.ars.usda.gov/>. Zugriff 20.11.2023.
- VOGT, S. (o.J.): *Kaltluftseen in der Schweiz – La Brévine*. <https://kaltluftseen.ch/la-brevine/>, Zugriff 19.10.2023.
- WEISCHET, W.; ENDLICHER, W. (2018): *Einführung in die allgemeine Klimatologie*. Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Berlin, Stuttgart.
- WULF, E. (2022): *Eine neue Winterhärtezonenkarte für Europa*. Forschungsbericht. Hochschule Osnabrück (unveröffentlicht).
- WULF, E. (2023): *Erstellung einer neuen Winterhärtezonenkarte für Europa unter Berücksichtigung mesoklimatischer Effekte*. Masterarbeit. Hochschule Osnabrück (unveröffentlicht).
- WÜRLINGER, R.; BERGANT, S.; LEMBERGER, I. (2022): *Naturpark Neusiedler See – Leithagebirge*. [www.bluehendesoesterreich.at/partner/naturpark-neusiedler-see-leithagebirge](https://www.bluehendesoesterreich.at/partner/naturpark-neusiedler-see-leithagebirge), Zugriff 10.10.2023.
- ZHU, X. (2016): *GIS for Environmental Applications. A practical approach*. Taylor and Francis, Abingdon.

## Kartenmaterial und Datensätze

- BEV [BUNDESAMT FÜR EICH- UND VERMESSUNGSWESEN] (2021): *DGM-Rasterweite\_100 m\_15.04.2021*. [https://www.bev.gv.at/portal/page?\\_pageid=713,2601273&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](https://www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,2601273&_dad=portal&_schema=PORTAL), Zugriff 10.12.2022.
- BKG [BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE] (2022): *Digitales Geländemodell Gitterweite 200 m (DGM200)*. <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitales-gelandemodell-gitterweite-200-m-dgm200.html>, Zugriff 10.12.2022.
- BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE SWISSTOPO (2022): *DHM25/200m*. <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/height/dhm25200.html#links>, Zugriff 10.12.2022.
- CLMS (COPERNICUS LAND MONITORING SERVICE) (2022): *EU-DEM v1.0*. <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1-0-and-derived-products/eu-dem-v1-0>, Zugriff 10.12.2022.
- CLMS (COPERNICUS LAND MONITORING SERVICE) (2022): *Aspect*. <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1-0-and-derived-products/aspect>, Zugriff 10.12.2022.
- CLMS (COPERNICUS LAND MONITORING SERVICE) (2022): *Slope*. <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1-0-and-derived-products/slope>, Zugriff 10.12.2022.
- CMLS (COPERNICUS LAND MONITORING SERVICE) & EEA (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY) (2019): *EU-Hydro – River Network Database, Version 1.3*. <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-hydro/eu-hydro-river-network-database?tab=download>, Zugriff 10.12.2022.
- CORNES, R.; VAN DER SCHRIER, G.; VAN DEN BESSELAAR, E. J. M.; JONES, P. D. (2018): *An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Datasets*, *J. Geophys. Res. Atmos.* 123. DOI: 10.1029/2017JD028200
- EEA [EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY] (2022): *WISE Large rivers and large lakes*. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/wise-large-rivers-and-large-lakes>, Zugriff 10.12.2022.
- EUROGEOGRAPHICS (2020): *Countries 2020*. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/reference-data/administrative-units-statistical-units/countries>, Zugriff 10.12.2022.

EARTHSTAR GEOGRAPHICS (2022): Bilddaten.  
[https://www.arcgis.com/apps/View/index.html?  
appid=504e3ff67457481e839bb941a709350f](https://www.arcgis.com/apps/View/index.html?appid=504e3ff67457481e839bb941a709350f),  
Zugriff 13.12.2022.

L'ADMINISTRATION DE LA NAVIGATION AÉRIENNE  
DU LUXEMBOURG (2022): Digital Terrain Model  
(Standard ICAO). Le Gouvernement du Grand-  
Duché de Luxembourg. [https://data.public.lu/en/  
datasets/digital-terrain-model-standard-icao-2/#](https://data.public.lu/en/datasets/digital-terrain-model-standard-icao-2/#),  
Zugriff 10.12.2022.

**Autoren:**

ELENA WULFF  
Drususstraße 28  
40549 Düsseldorf  
E-Mail: elena.wulff@web.de

Prof. Dr. JÜRGEN BOUILLON  
Hochschule Osnabrück  
Am Krümpel 31  
49090 Osnabrück  
E-Mail: j.bouillon@hs-osnabrueck.de