

Der IPCC und die Grenzen der Klimawissenschaft

Der globale Temperaturverlauf der letzten 2000 Jahre

Seit 1990 hat das *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) sechs Sachstandsberichte (*Assessment Reports*, AR1–6) zum Klima erstellt. Diese Berichte werden jeweils von einem *Summary for Policymakers* (SPM) begleitet, das zuletzt im Jahr 2021 erschien und in seiner ersten Abbildung prominent den Temperaturverlauf der letzten 2000 Jahre zeigt. Demnach wäre das erste Jahrtausend nach Christus von gleichbleibenden Temperaturen geprägt worden, gefolgt von einem mehrhundertjährigen Abkühlungstrend in die Kleine Eiszeit und daran anschließend die anthropogene Erwärmung. Diese Rekonstruktion basiert auf 199 Klimaarchiven, anhand derer die globalen (Land und Ozean) Temperaturen approximiert wurden. Wir argumentieren hier, dass diese Rekonstruktion im ersten Jahrtausend zu flach und ihre Unsicherheiten unverhältnismäßig klein sind, wodurch ein zu gutes Verständnis des Paläoklimas suggeriert wird und die anthropogene Erwärmung dramatischer erscheint. Dieser Eindruck wird zusätzlich dadurch verstärkt, dass keine weiteren Temperaturrekonstruktionen im SPM oder AR inkludiert wurden. Eine vollständige Darstellung des Wissensstands und der Unsicherheiten ist jedoch wichtig, um (i) unser Verständnis natürlicher Temperaturschwankungen nicht zu überschätzen und (ii) notwendige Feldforschung zur Erstellung neuer Klimaarchive nicht zu konterkarieren.

Zwanzig Jahre nach der Präsentation des „Hockey Sticks“ [1] im SPM 2001 hat das IPCC sich wieder dazu entschieden, nur eine einzige Temperaturrekonstruktion in den AR6 und SPM 2021 aufzunehmen (Abb. 1). Die neue Rekonstruktion zeigt die globalen Land- und Ozeantemperaturen in jährlicher Auflösung (von April bis März) seit Christi Geburt, abgeleitet aus 199 marinen und terrestrischen Archiven einschließlich Baumringen, Eiskernen, Korallen, Speläothemen, See- und Meeressedimenten [2]. Die im SPM 2021 dargestellte Kurve (hiernach: SPM21) ist der geglättete Median eines Ensembles aus Einzelrekonstruktionen, das mit insgesamt sieben verschiedenen Methoden berechnet wurde (Median und Unsicherheiten sind verfügbar hier: [3]). Demnach waren die Temperaturen im ersten Jahrtausend weitgehend stabil, wonach das zweite Jahrtausend durch einen anhaltenden Abkühlungstrend und die abrupte Erwärmung seit Mitte des 19. Jahrhunderts geprägt ist (Abb. 1d). SPM21 fluktuiert im ersten Jahrtausend in einem Bereich von 0,27°C und im zweiten Jahrtausend von 0,35°C. Mit einem Anstieg von 1,29 °C seit Beginn des 20. Jahrhunderts verlassen die gemessenen Temperaturen (rot in Abb. 1 dargestellt) den natürlichen Schwankungsbereich der letzten 2000 Jahre.

IPCC 2001–2013: Der *Hockey Stick* und seine Nachwirkungen

Nachdem der Hockey Stick im SPM 2001 gezeigt wurde und schnell zu einer visuellen Ikone des globalen Klimawandels aufstieg, gab es unter Paläoklimatologen eine breit geführte Debatte über die Unsicherheiten großräumiger Rekonstruktionen, die zumindest teilweise in Vergessenheit geraten scheint [4–7]. Zu den Hauptkritikpunkten zählten: (i) Eine zu geringe Amplitude natürlicher Temperaturschwankungen aufgrund veralteter Standardisierungsverfahren dendrochronologischer Baumringsequenzen [8], (ii) eine unzureichende räumliche Abdeckung aufgrund fehlender Daten aus den Tropen [9,10], (iii) eine fehlerhafte Abschätzung der Jahresmitteltemperaturen, da die Mehrzahl der verwendeten Archive sommer-sensitive Baumringchronologien waren [11,12] und (iv) methodische Entscheidungen, die langfristige Temperaturtrends verringern anstatt sie zu betonen [13–19].

Motiviert durch den methodischen Diskurs entwickelten mehrere Forschergruppen neue Rekonstruktionen für Regionen, aus denen auch tausendjähriger Klimaarchive vorlagen, nämlich den nördhemisphärischen Außertropen [20–24]. Die meisten Studien fokussierten Landtemperaturen (anstatt Land-

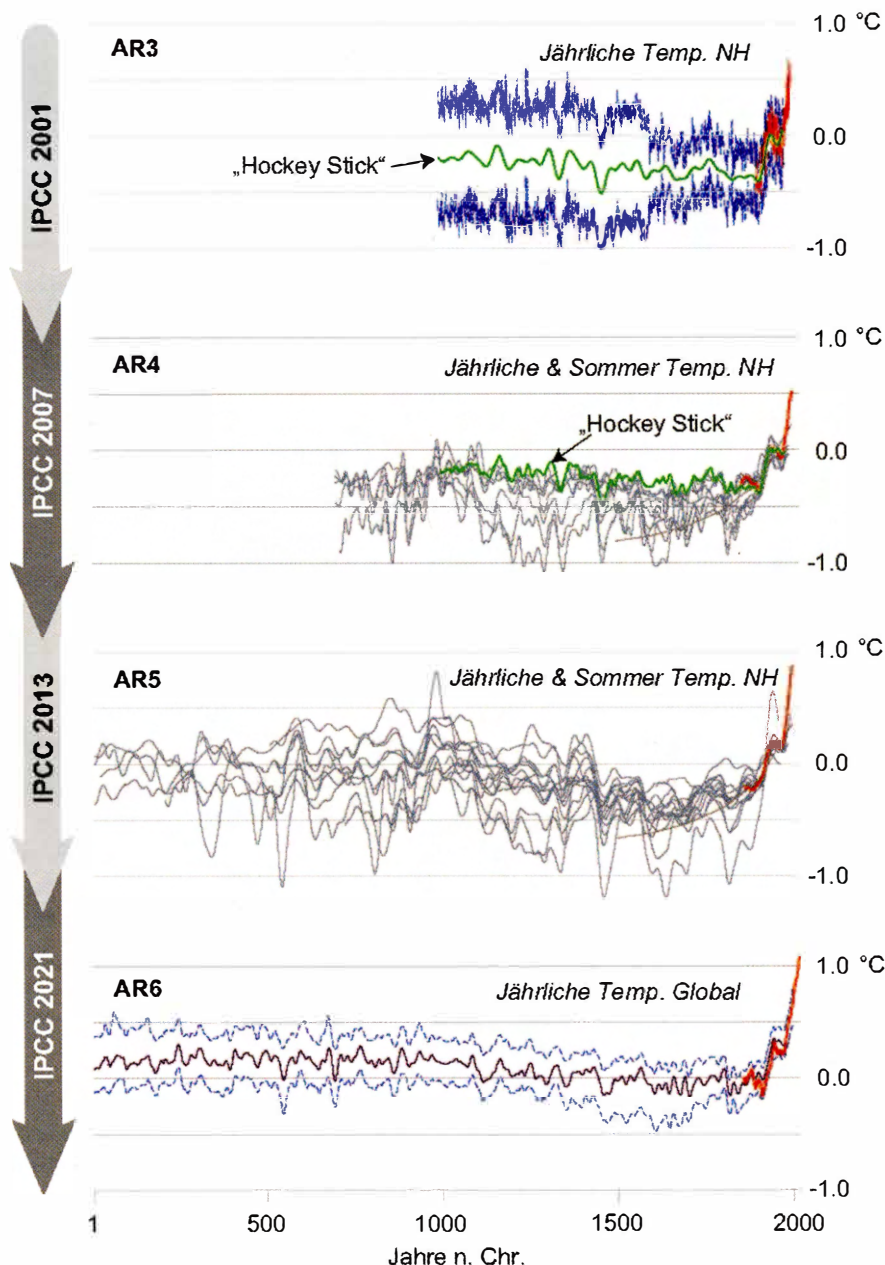


Abb. 1 Temperaturrekonstruktionen der letzten 1000 bis 2000 Jahre in den IPCC Sachstandsberichten AR3–6. AR3: Die „Hockey Stick“-Rekonstruktion der Jahresmitteltemperaturen der letzten 1000 Jahre für die Nordhemisphäre (grün). Unsicherheiten sind in blau und die instrumentellen Messungen seit 1860 in rot dargestellt [1]. AR4: Zwölf Rekonstruktionen der Jahresmittel- und Sommertemperaturen seit 700 n. Chr. (in grau, außer [1] in grün) zusammen mit den instrumentellen Messungen seit 1856. AR5: Fünfzehn Rekonstruktionen der Jahresmittel- und Sommertemperaturen seit dem 1. Jahrhundert n. Chr. und instrumentelle Messungen seit 1881. AR6: Rekonstruktion der globalen Jahresmitteltemperaturen der letzten 2000 Jahre (schwarz) und Unsicherheiten (blau) [2] zusammen mit instrumentellen Messungen seit 1850. Für die Berechnung von Temperaturanomalien wurden in den verschiedenen Berichten unterschiedliche Referenzperioden zwischen 1850 und 1990 verwendet. Mit Ausnahmen der Unsicherheiten und instrumentellen Daten im AR3 wurden alle Kurven mit einem 30-jährigen Filter geglättet. [Quelle: IPCC]

und Ozeantemperaturen), da die Mehrzahl der Klimaarchive terrestrischen Ursprungs sind [25–28] (Abb. 2 und 3). Andere verwendeten ausschließlich jährlich aufgelöste Baumringchronologien [29], die mit neuen Verfahren standardisiert wurden [30–33]. Und schließlich reichten aufgrund der kontinuierlichen Entwicklung weiterer Klimaarchive die neuen Kurven weiter in die Vergangenheit zurück, und es wurden zumeist Sommer- anstatt Jahresmitteltemperaturen rekonstruiert [34,35].

Diese Entwicklung spiegelte sich auch in den folgenden IPCC-Berichten von 2007 (AR4) und 2013 (AR5) wider, in denen, anstatt nur einer, eine Vielzahl an Temperaturrekonstruktionen für die letzten 1300 und 2000 Jahre dargestellt wurden (Abb. 1b–c). Als Konsequenz der methodischen Weiterentwicklungen Anfang der 2000er Jahre hat der im AR4 nochmals gezeigte Hockey Stick, verglichen mit allen anderen Rekonstruktionen, die geringste Variabilität. Die natürlichen Temperaturschwankungen sind in diesen neueren Rekonstruktionen also deutlich grö-

ßer, und es entsteht für die Nordhemisphäre ein Bild, wonach die Temperaturen von einem Mittelalterlichen Klimaoptimum vor 1000 Jahren bis in die kälteste Phase der Kleinen Eiszeit im 14. bis 17. Jahrhundert um $\sim 1^\circ\text{C}$ abkühlten. Entscheidend ist dabei, dass die einzelnen Rekonstruktionen unterschiedliche Verläufe einnehmen und dass die Unterschiede – und somit auch die visuell vermittelten Unsicherheiten – erheblich sind.

Status Quo: IPCC 2021 und nicht berücksichtigte Rekonstruktionen

Während also die Unterschiede zwischen den einzelnen Rekonstruktionen im AR4 und AR5 genutzt wurden, um Unsicherheiten zu verdeutlichen, ging diese Information durch die Zuspitzung auf nur eine Rekonstruktion im AR6 verloren [36]. Der visuelle Eindruck eines deutlich besseren Verständnisses des Temperaturverlaufs wurde zusätzlich durch einen unrealistisch kleinen Fehlerbereich verstärkt (die gestrichelten Kurven in



Abb. 2 Diese nahezu 1100 Jahre alte Panzerkiefer (*Pinus heldreichii*) auf dem Berg Smolikos im Pindos-Gebirge ist der bislang älteste dendrochronologisch datierte Baum aus Nordwest-Griechenland; er wurde vom Forscherteam „Adonis“ getauft. [Foto: J. Esper]

Abb. 1d). Diese Unsicherheiten resultieren aus der iterativen Anwendung verschiedener Methoden, um aus dem globalen Netzwerk von 199 Klimaarchiven unterschiedliche Ensembles an Einzelrekonstruktionen zu berechnen. Diese Art der Berechnung führt unter anderem dazu, dass die Fehlerspanne zurück in die Vergangenheit nicht größer wird, obwohl die meisten Klimaarchive keine 2000 Jahre umfassen und deshalb die Anzahl der Prädiktoren von 199 im Jahr 1800 n. Chr. auf gerade mal 20 im ersten Jahr der Rekonstruktion abnimmt (siehe Tabelle 1 und zum Vergleich die gestrichelten Kurven in Abb. 1a). Die Unsicherheiten von SPM21 sind deshalb weitgehend konstant, bis auf eine unscheinbare Zunahme während der Kleinen Eiszeit,

als das Ensemble einer bestimmten Methode (Bayes Statistik) besonders kühle Temperaturen anzeigte.

Seit dem letzten Report aus dem Jahre 2013 wurden weitere Temperaturrekonstruktionen für die letzten 1000–2000 Jahre publiziert, die wir hier ganz im Stile von AR4 und AR5 in einer Abbildung zusammenfassen (Abb. 4). Die neuen Arbeiten basieren primär auf Baumringarchiven und zeigen die Landtemperaturen der Nordhemisphäre außerhalb der Tropen [37–42].

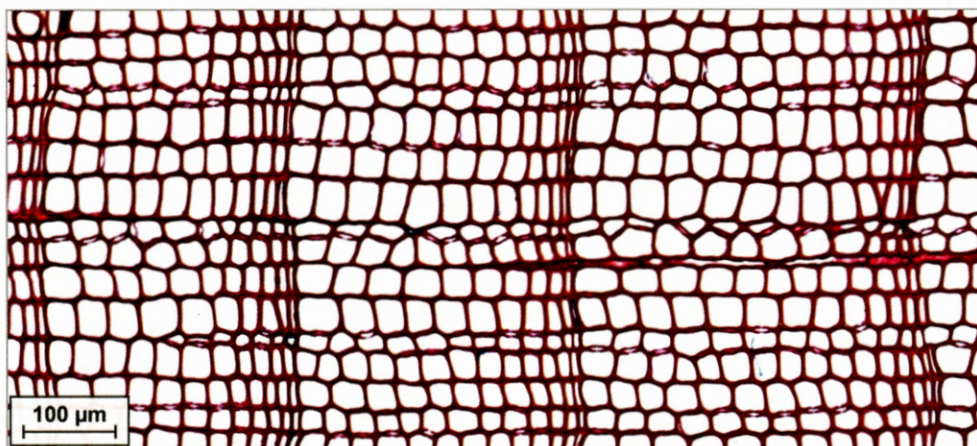


Abb. 3 Sequenz von drei Jahrringen einer Panzerkiefer aus dem Pindos-Gebirge. Dendrochronologen verwenden alle Informationen bis hin zu Veränderungen in der Zellstruktur, um Klimaveränderungen zu rekonstruieren. [Aufnahme: J. Esper]

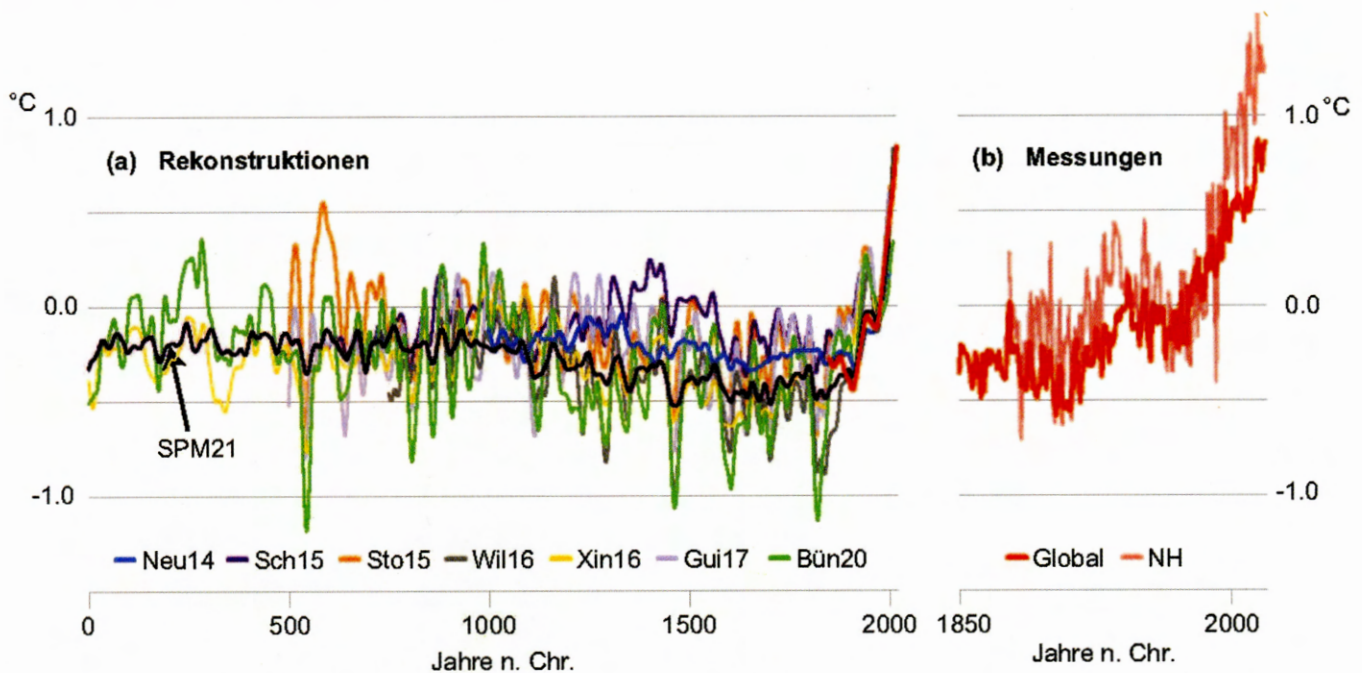


Abb. 4 Aktueller Wissensstand zum Temperaturverlauf der letzten 2000 Jahre. (a) Rekonstruktionen der Temperaturen der nördlichen Hemisphäre (Sch15, Sto15, Wil16, Xin16, Gui17, Bün20), der südlichen Hemisphäre (Neu14) und der globalen Temperaturen (SPM21) (siehe Tabelle 1 für Details). Die rote Kurve zeigt die instrumentell gemessenen Jahresmitteltemperaturen der globalen Land- und Ozeanflächen seit 1850 n. Chr. Alle Zeitreihen wurden mit einem 30-jährigen Filter geglättet und als Anomalien zur Referenzperiode 1961–1990 dargestellt. (b) Die globalen Jahresmitteltemperaturen aus (a) im Vergleich zu den Sommertemperaturen der nördlichen Hemisphäre für den Bereich von 30–90°N seit 1878 n. Chr.

Darüber hinaus ist eine Studie erschienen, die ebenso wie SPM21 neben den jahrgenauen Baumringen noch weitere Klimaarchive verwendet (siehe grüne und gelbe Flächen in Tabelle 1), um in diesem Fall die Land- und Ozeantemperaturen der Südhemisphäre zu rekonstruieren [43]. Beim Vergleich all dieser Rekonstruktionen in einer Abbildung müssen diese unterschiedlichen Räume (Hemisphäre vs. Global, Land vs. Land & Ozeane) berücksichtigt werden, was sehr gut in den unterschiedlich starken Anstiegen der globalen [44] und nordhemisphärischen [45] instrumentellen Temperaturen zum Ausdruck kommt (in Abb. 4b rechts dargestellt). Die instrumentellen Temperaturen repräsentieren gleichzeitig die unterschiedlichen Zielgrößen einzelner Rekonstruktionen und man erkennt auf Anhieb die deutlich geringere Varianz der globalen Kurve, was vor allem durch die Hinzunahme der Tropen und der Ozeantemperaturen verursacht wird (siehe nächstes Kapitel zur Variabilität).

Neben den unterschiedlichen Regionen variiert auch die Saisonalität der rekonstruierten Temperaturen zwischen den einzelnen Studien. Während fünf der sechs nordhemisphärischen Rekonstruktionen die Sommerbedingungen zwischen Juni und August widerspiegeln, zeigen die südhemisphärische und globale Rekonstruktion jeweils die Jahresmitteltemperaturen von Mai bis April bzw. April bis März (Tabelle 1). Dabei ist zu bedenken, dass die Rekonstruktion globaler Jahresmitteltemperaturen mit vorwiegend sommer-sensitiven Klimaarchiven, wie Baumjahren, eigentlich nicht möglich ist. Dies liegt daran, dass die Kombination südhemisphärischer Sommertemperaturen (Dezember-Februar) mit nordhemisphärischen Sommertem-

peraturen (Juni-August) keine globalen Jahresmitteltemperaturen ergeben.

Wenn man die Rekonstruktionen nun genauer vergleicht, fällt auf, dass sie trotz unterschiedlicher Varianzen recht ähnliche dekadische bis multi-dekadische Fluktuationen zeigen. Die Unterschiede liegen demnach weniger im Timing der hochfrequenten Variationen, sondern in den mehrhundertjährigen Trends und unterschiedlichen Temperaturamplituden. Insgesamt erscheint das zweite Jahrtausend weitgehend kohärent, da fast alle Rekonstruktionen (außer Sch15) eine markante Abkühlung vom Mittelalter in die Kleine Eiszeit zeigen. Vor dem Mittelalter deuten Xin16 und Bün20 auf kühlere Bedingungen zurück bis ins 6. Jahrhundert hin, während ein vergleichbarer Trend in SPM21 nicht zu erkennen ist. Derart kältere Bedingungen während der sogenannten Spätantiken Kleinen Eiszeit [46] sind auch bereits im AR5 von 2013 in Rekonstruktionen der Nordhemisphäre zu erkennen [24,47,48].

Das Problem mit der Variabilität

Ein Argument für die Entscheidung des IPCC, nur eine Rekonstruktion zu zeigen, besteht darin, dass seit dem letzten Report von 2013 keine weitere globale Temperaturrekonstruktion mehr publiziert wurde (davor [49] in AR4 und [48] im AR5). Wir schauen deshalb noch etwas genauer auf die unterschiedliche Variabilität der hemisphärischen und globalen Kurven, um im nächsten Kapitel auf die Wiederverwendung von Daten einzugehen. Ein statistisches Maß für die Variabilität von Temperaturen ist die Standardabweichung (in °C), die wir hier für die Rekonstruktionen und instrumentellen Zielgrößen, also die gemesse-

Tabelle 1. Wichtige Eckdaten zu gemessenen und rekonstruierten großräumigen Temperaturen der vergangenen Jahrzehnte bis Jahrhunderte (Stabw. = Standardabweichung, JJA = Juni-August, MJJA = Mai-August).

Instrumentelle Daten									
Datensatz		Zeitraum		Temperaturbereich		Stabw. 1878–2020		Differenz 2010er-1880er	
Global		1850-2020		Land & Ozean 90°S-90°N		0,37 °C		1,13 °C	
NH		1878-2020		Land 30-90°N		0,47 °C		1,46 °C	
Rekonstruktionen				Anzahl Archive 1800 n. Chr.		Anzahl Archive 1000 n. Chr.		Anzahl Archive im ersten Jahr	
Paper	Zeitraum	Saison	Tempera- turbereich	Bäume	Andere	Bäume	Andere	Bäume	Andere
Neu14 [43]	1000–1992	Mai-Apr	Land & Ozean 0–90°S	31	43	2	6		
Sch15 [37]	600–2002	JJA	Land 30–90°N	15	–	7	–	3	–
Sto15 [38]	500–2003	JJA	Land 40–90°N	233	–	40	–	12	–
Wil16 [39]	750–2011	MJJA	Land 40–75°N	54	–	23	–	4	–
Xin16 [40]	1–2000	Annuell	Land 30–90°N	125	–	63	–	16	–
Gui17 [41]	500–2000	JJA	Land 40–90°N	25	3	17	3	6	–
Neu19 [2]	1–2000	Apr-Mar	Land & Ozean 90°S–90°N	140	59	27	28	6	14
Bün20 [42]	1–2010	JJA	Land 30–90°N	7	–	7	–	7	–

nen globalen und hemisphärischen Temperaturen, zeigen (linke Säulen in Abb. 5). Demnach liegt der Wert der nordhemisphärischen Zielgröße 0.05°C über dem globalen, was man auch ganz gut an den Kurvenverläufen in Abb. 4b erkennen kann.

Dieser Varianz-Unterschied fließt folgerichtig in die einzelnen Rekonstruktionen ein, wobei insbesondere die globale (SPM21) und südhemisphärische (Neu14) Kurve durch reduzierte Standardabweichungen bereits im instrumentellen Zeitfenster von 1878–2000 n. Chr. auffallen. (*Sch15 ist ein Sonderfall,*

da diese Rekonstruktion bereits 1975 n. Chr. endet und die Standardabweichung deshalb reduziert ist.) Diese Reduktion der Temperaturvariabilität setzt sich in den Rekonstruktionsperioden von 1001–1877 und 1–1000 n. Chr. fort (orangene und graue Säulen in Abb. 5) und ist auf die Verwendung nicht-annueller Klimaarchive und zunehmende Datierungsunsicherheit zurückzuführen, wodurch im ersten Jahrtausend der visuelle Eindruck besonders ausgeglichener Temperaturen entsteht [50]. Diese Veränderungen beeinflussen auch die Möglichkeit, abrupt-

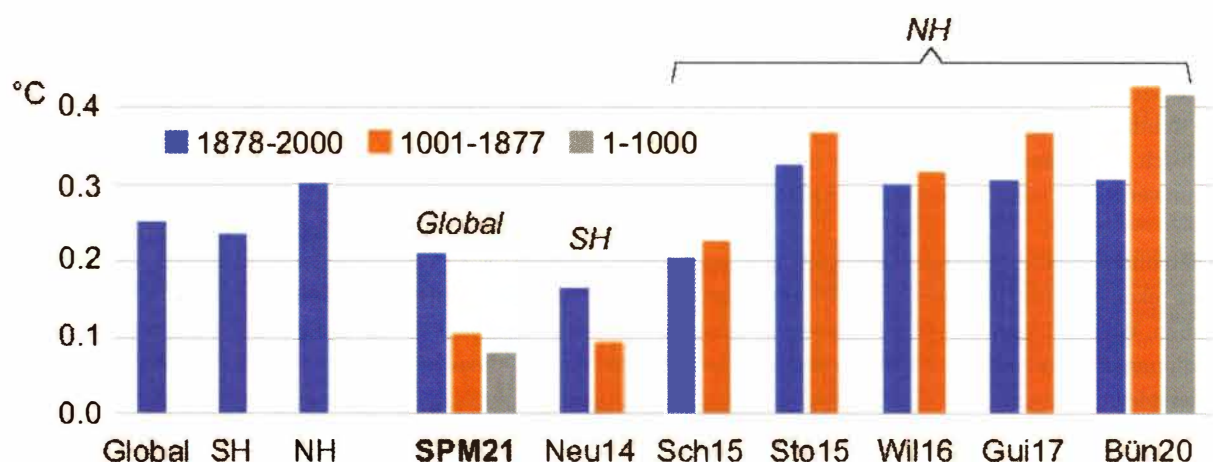
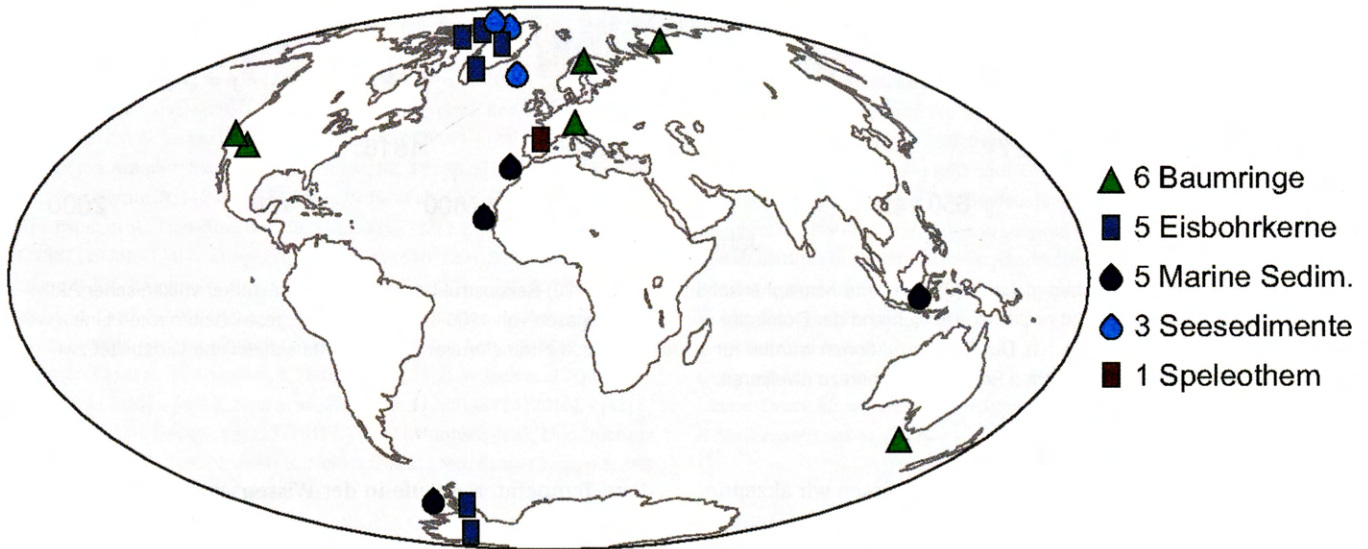


Abb. 5 Standardabweichungen (in °C) instrumenteller und rekonstruierter Temperaturen von 1878–2000 (blau), 1001–1877 (orange) und 1–1000 n. Chr. (grau). Die drei Säulen auf der linken Seite zeigen die instrumentellen Werte für die Jahresmitteltemperaturen der globalen Land- und Ozeanflächen (global, siehe auch Abb. 4b), die Jahresmitteltemperaturen der südhemisphärischen Land- und Ozeanflächen (SH) und die Sommertemperaturen der nordhemisphärischen Landflächen von 30–90°N (NH, ebenfalls in Abb. 4b). Bei den Rekonstruktionen fehlt Xin16 aus Tabelle 1, da diese Studie keine jährliche Auflösung hat.

Abb. 6 2000-jährige Klimaarchive im SPM21.



te Abkühlungsereignisse nach großen Vulkanausbrüchen akkurat zu rekonstruieren [51-55], was bei Vergleichen zwischen dem zweiten und ersten Jahrtausend gezeigt werden konnte [56,57]. Grundsätzlich gelten Varianzverluste in der Paläoklimatologie nicht als problematisch, wenn sie durch realistische Unsicherheitsschätzungen kompensiert werden [58]. Aber genau das ist im SPM 2021 nicht der Fall, da die hier dargestellte, gleichbleibende Fehlerspanne methodische Unterschiede anstatt der abnehmenden Anzahl an Umweltarchiven berücksichtigt.

Das Problem mit der Replikation und Wiederverwendung von Daten

Ein Blick auf die Anzahl verwendeter Archive zeigt eine erhebliche Bandbreite von sieben Prädiktoren in Bün20 bis 233 in Sto15 im Jahr 1800 n. Chr. (Tabelle 1). Gleichzeitig ist allen Rekonstruktionen (bis auf Bün20) gemein, dass die Anzahl an integrierten Klimaarchiven in die Vergangenheit stark abnimmt, bis zu Beginn der einzelnen Rekonstruktionen nur noch zwischen drei (Sch15) und 20 (SPM21) zur Verfügung stehen (Abb. 6). Dabei ist zusätzlich zu bedenken, dass jede einzelne Baumjahr-ringchronologie (in grün in Tabelle 1) im 20. Jahrhundert viel mehr Bäume integriert als zu Beginn ihrer Berechnung, was den Replikationsverlust in die Vergangenheit nochmal verstärkt [59-61]. Für SPM21 bedeutet dies eine Reduktion der Replikation von ~95% gegenüber 1800 n. Chr. Der Wegfall von Klimaarchiven ist dabei in den niederen Breiten besonders markant, da keines der insgesamt 40 tropischen Korallenarchive länger als 400 Jahre ist. Somit beinhaltet SPM21 nur fünf 2000-jährige Archive aus der Südhemisphäre, von denen nur eines eine jährlich aufgelöste Baumjahr-ringchronologie aus Tasmanien ist (Abb. 6). Dieser Umstand hält viele Paläoklimatologen von dem Versuch ab, globale Land- und Ozeantemperaturen für die letzten 2000 Jahre zu rekonstruieren.

Aufgrund der wenigen südhemisphärischen Datenpunkte liegt der geographische Median des gesamten SPM21-Netz-

werks bei 45°N [?62, weshalb sich nordhemisphärische und globale Rekonstruktionen zwangsläufig sehr ähnlich sind. Dies wird beim Vergleich einzelner Rekonstruktionen während der Phase der anthropogenen Erwärmung, aber auch bei abrupten Temperaturregressen nach großen Vulkanausbrüchen deutlich (Abb. 7). Letztere sind in allen Rekonstruktionen durch die Dominanz und Wiederverwendung der gleichen, jährlich aufgelösten Baumringchronologien geprägt, weshalb man davon ausgehen muss, dass diese Temperaturschwünge keine Informationen über Winterbedingungen enthalten. Im Falle von SPM21 darf man aber attestieren, dass die Verwendung der oben erwähnten Korallenarchive aus den Tropen wahrscheinlich schon zu einer regionalen Erweiterung der Saisonalität beitragen. Da diese Daten aber nur bis ins 17. Jahrhundert zurückreichen, kommt es davor zu einer räumlichen Verschiebung von den Tropen in höhere Breiten und einer saisonalen Verschiebung in die warmen Jahreszeiten.

Synthese und Ausblick

Zwanzig Jahre nach dem *Hockey Stick* wurde wieder eine einzelne Temperaturrekonstruktion in das SPM 2021 des IPCC aufgenommen. Ein Vergleich dieser Kurve mit anderen Rekonstruktionen zeigt weitgehend kohärente Trends im zweiten Jahrtausend n. Chr., aber erhebliche Diskrepanzen davor. Das erste Jahrtausend ist durch einen starken Rückgang hochauflösender Klimaarchive gekennzeichnet, was alle großräumigen Rekonstruktionen betrifft. Die Schlussfolgerung des IPCC, wonach dieser Zeitraum frei von langfristigen Temperaturren-trends ist, erscheint deshalb nicht validiert und der systematische Verlust an Variabilität hat eher methodische Ursachen.

Diese Arbeit zeigt, dass ältere paläoklimatische Befunde leider in Vergessenheit geraten sind und in mindestens vier Bereichen Handlungsbedarf besteht: (i) Aufgrund der Dominanz von Baumringarchiven in den letzten 2000 Jahren sollten Sommer- anstatt Jahresmitteltemperaturen rekonstruiert werden. (ii)

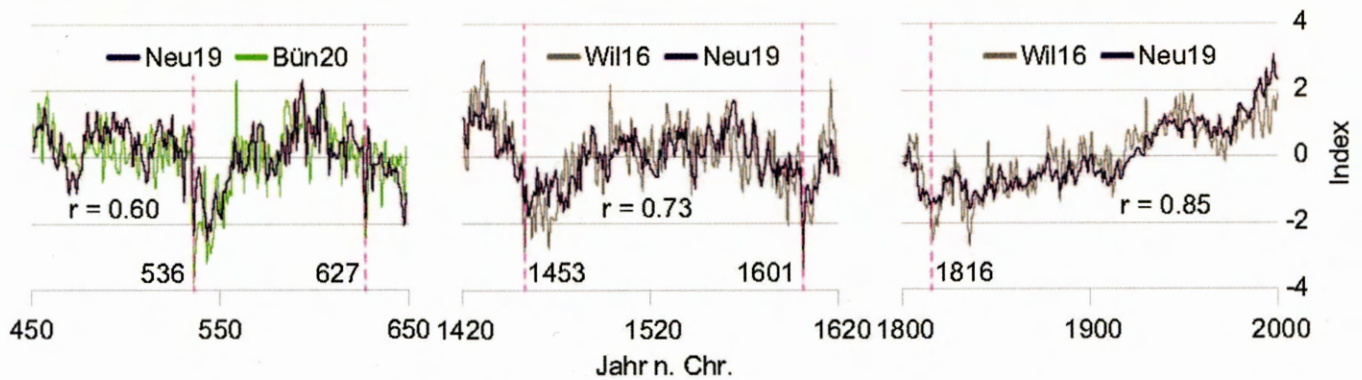


Abb. 7 Gleichläufigkeit zwischen globaler (SPM21) und hemisphärischen (Wil16, Bün20) Rekonstruktionen in Perioden starker vulkanischer Aktivität von 450–650 und 1420–1620 n. Chr., sowie während der Dominanz von Treibhausgasen von 1800–2000 n. Chr. Die gestrichelten roten Linien weisen auf große Vulkanausbrüche hin. Die Rekonstruktionen wurden für diesen Vergleich z-transformiert, um die unterschiedliche Variabilität zwischen globalen und hemisphärischen Rekonstruktionen zu nivellieren.

Auch wenn die Ambition verständlich ist, müssen wir akzeptieren, dass aus den Tropen und der gesamten Südhemisphäre zu wenige Klimaarchive vorliegen, um die Temperaturen der letzten 2000 Jahre zu rekonstruieren. (iii) Die mit der Zeit abnehmende Qualität und Quantität der Klimaarchive müssen bei der Berechnung von Unsicherheiten berücksichtigt werden. (iv) Da unterschiedliche Studien bei der Verwendung gleicher Daten zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen [63], sollten verschie-

dene Temperaturverläufe in der Wissenschaftskommunikation berücksichtigt werden.

Die Applikation neuer Assimilationstechniken wird dazu beitragen, geographische Lücken im Netzwerk der Klimaarchive zu identifizieren und statistische Unsicherheiten zu quantifizieren [64–69]. Allerdings liegt die eigentliche Herausforderung nicht bei methodischen Entwicklungen, um Klimaarchive besser über einen großen Raum zusammenzufassen. Hier wäre es bereits hilfreich, die ältere Literatur nicht aus den Augen zu verlieren. Im Vergleich zur Berechnung einer hemisphärischen oder globalen Kurve, die nicht länger als einige Wochen dauert, benötigt die Erstellung eines neuen Klimaarchives, das in hoher zeitlicher Auflösung die letzten 2000 Jahre umfasst, in der Regel mehrere Jahre bis Jahrzehnte. Die hier gezeigte Inkonsistenz zwischen den Rekonstruktionen und der Verlust an Variabilität gehen aber im Wesentlichen auf die Reduktion und das Fehlen genau solcher Archive im ersten Jahrtausend zurück. Deshalb darf die im SPM 2021 dargestellte, über 2000 Jahre gleichbleibende Unsicherheitsspanne nicht zum Anlass genommen werden, die langwierigen und teilweise kostenintensiven Bemühungen zur Erstellung neuer Klimaarchive zu untergraben.

Danksagung

Diese Arbeit wurde durch den ERC Advanced Grant MONOSTAR (AdG 882727), den Czech Science Foundation Grant HYDRO8 (23–08049S), sowie das Zentrum für Interdisziplinäre Forschung (ZiF) in Bielefeld unterstützt (<https://www.uni-bielefeld.de/einrichtungen/zif/index.xml>).

Literatur

- [1] M. Mann et al., *Geophys. Res. Lett.* **26**, 759 (1999). - [2] R. Neukom et al., *Nat. Geosci.* **12**, 643 (2019). - [3] <https://www.ncei.noaa.gov/access/paleo-search/study/26872> - [4] W.S. Broecker, *Science* **291**, 1497 (2001). - [5] R.N. Harris & D.S. Chapman, *Geophys. Res. Lett.* **28**, 747 (2001). - [6] H. Beltrami, *Geophys. Res. Lett.* **29**, 26 (2002). - [7] D. Frank et al., *WIREs Clim. Change* **1**, 507 (2010). - [8] J. Esper et al., *Science* **295**, 2250 (2002). - [9] S. Huang, S. et al., *Nature* **403**, 756–758 (2000). - [10] S. Rutherford et al., *J. Clim.* **18**, 2308 (2005). - [11] K.R. Briffa & T. Osborn, *Science* **295**, 2227 (2002). - [12] R. Wilson et al., *J. Geophys. Res. A* **112**, D17103 (2007). - [13] H. von Storch et al., *Science* **306**, 679–682 (2004). - [14] G. Bürger & U. Cubasch, *Geophys. Res. Lett.* **32**, L23711 (2005). - [15] S. McIntyre & R. McKittrick, *Geophys. Res. Lett.* **32**, L03710 (2005). - [16] E.R. Wahl et al., *Clim. Change* **85**, 33(2007). - [17] B. Christian-

WAS IST DAS IPCC?

Der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderung (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC), der oft als Weltklimarat bezeichnet wird, wurde 1988 durch das Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) und der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) ins Leben gerufen. Hauptaufgabe des IPCC ist, den Stand der wissenschaftlichen Forschung zum Klimawandel zusammenzufassen. Das IPCC macht also keine eigenständige Forschung und sollte auch nicht als Entscheidungsträger für politisches Handeln verstanden werden. Für die Berichte werden Fachleute aus der ganzen Welt eingeladen, um als Autoren und Gutachter unentgeltlich zu arbeiten. Die Sachstandsberichte (*Assessment Reports*, AR) bestehen aus drei Bänden, die jeweils von einer Arbeitsgruppe erstellt werden. Arbeitsgruppe I behandelt die naturwissenschaftlichen Grundlagen des Klimawandels. Arbeitsgruppe II beschäftigt sich mit der Verwundbarkeit und Anpassung von sozioökonomischen und natürlichen Systemen an den Klimawandel. Arbeitsgruppe III zeigt politische und technologische Maßnahmen zur Minderung des Klimawandels auf. Sonderberichte nach demselben Verfahren erstellt, behandeln aber klar abgegrenzte Themen in größerer Ausführlichkeit. Alle Sachstandsberichte durchlaufen ein mehrstufiges Begutachtungsverfahren und die wichtigsten Ergebnisse werden für politische Entscheidungsträger in einer kurzen Sonderausgabe zusammengefasst (*Summary for Policymakers*, SPM). Bisher gab es sechs Sachstandsberichte (AR1 bis AR6), die 1990, 1995, 2001, 2007, 2013/14 und 2021/22 publiziert wurden. Die äußerst umfangreichen Berichte der unterschiedlichen Disziplinen, wie (Paläo-) Klimatologie und Ökologie, sowie relevanter Teilbereiche der Umwelt- und Technologieforschung und Sozialwissenschaften sind unter <https://www.ipcc.ch/> frei verfügbar.

sen et al., J. Clim. **22**, 951 (2009). - [18] J.E. Smerdon et al., J. Clim. **23**, 4856 (2010). - [19] M.P. Tingley et al., Quat. Sci. Rev. **35**, 1 (2012). - [20] K.R. Briffa et al., J. Geophys. Res. A. **106**, 2929 (2001). - [21] J. Esper et al., Science **295**, 2250 (2002). - [22] G.C. Hegerl et al., J. Clim. **20**, 650 (2007). - [23] B. Christiansen & F.C. Ljungqvist, J. Clim. **24**, 6013 (2011). - [24] B. Christiansen & F.C. Ljungqvist, Clim. Past **8**, 765 (2012). - [25] K.R. Briffa et al., Glob. Planet. Change **40**, 11 (2004). - [26] R. D'Arrigo et al., J. Geophys. Res. A. **111**, D03103 (2006). - [27] M.N. Juckes et al., Clim. Past **3**, 591 (2007). - [28] F.C. Ljungqvist, Geografiska Annaler: Series A, Phys. Geogr. **92**, 339 (2007). - [29] U. Büntgen et al., Nat. Comm. **9**, 1 (2018). - [30] K.R. Briffa et al., Clim. Dyn. **7**, 111 (1992). [31] J. Esper et al., Tree-Ring Res. **59**, 81 (2003). - [32] J. Esper et al., Clim. Dyn. **54**, 1367 (2020). - [33] L. Klippel et al., Clim. Past **16**, 729 (2020) - [34] B. Christiansen & F.C. Ljungqvist, Rev. Geophys. **55**, 40 (2017). - [35] S. Lüning & P. Lengsfeld, Earth **3**, 401 (2022). - [36] U. Büntgen et al., Dendrochronologia **74**, 125982 (2022). - [37] L. Schneider et al., Geophys. Res. Lett. **42**, 4562 (2015). - [38] M. Stoffel et al., Nat. Geosci. **8**, 788 (2015). - [39] R. Wilson et al., Quat. Sci. Rev. **134**, 1 (2016). - [40] P. Xing et al., PLoS One **11**, e0146776 (2016). - [41] S. Guillet et al., Nat. Geosci. **10**, 123 (2017). - [42] U. Büntgen et al., Dendrochronologia **64**, 125757 (2020). - [43] R. Neukom et al., Nat. Clim. Change **4**, 362 (2014). - [44] C.P. Morice et al., J. Geophys. Res. Atmosph. **126**, e2019JD032361 (2021). - [45] T.J. Osborn et al., J. Geophys. Res. Atmosph. **126**, e2019JD032352 (2021). - [46] U. Büntgen et al., Nat. Geosci. **9**, 231 (2016). - [47] A. Moberg et al., Nature **433**, 7026 (2005). - [48] M.E. Mann et al., Proceed. Nat. Acad. Sci. USA **105**, 13252 (2008). - [49] M.E. Mann & P.D. Jones, Geophys. Res. Lett. **30**, 15 (2003). - [50] J. Esper & U. Büntgen, Clim. Research, **83**, 57 (2021). - [51] K.J. Anchukaitis et al., Nat. Geosci. **5**, 836 (2012). - [52] J. Esper et al., Bull. Volcanol. **75**, 1 (2013). - [53] K.J. Anchukaitis et al., Quat. Sci. Rev. **163**, 1 (2017). - [54] J. Esper et al., Bull. Volcanol. **79**, 41 (2017). - [55] F. Zhu et al., Geophys. Res. Lett. **47**, 8 (2020). - [56] M. Sigl et al., Nature **523**, 543 (2015). - [57] G. Plunkett et al., Clim. Past **18**, 45 (2022). - [58] E.R. Cook & L.A. Kairiukstis: Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences. Dordrecht, 1990. - [59] J. Esper et al., Quat. Sci. Rev. **145**, 134 (2016). - [60] J. Esper et al., Dendrochronologia **50**, 81 (2018). - [61] F.C. Ljungqvist et al., Quat. Sci. Rev. **230**, 106074 (2020). - [62] K.J. Anchukaitis & J.E. Smerdon, Quat. Sci. Rev. **286**, 107537 (2022). - [63] U. Büntgen et al., Nat. Comm. **12**, 1 (2021). - [64] G.J. Hakim et al., J. Geophys. Res. Atmos. **121**, 6745 (2016). - [65] N.J. Steiger et al., Sci. Data **5**, 1 (2018). - [66] R. Tardif et al., Clim. Past **15**, 1251 (2019). - [67] V. Valler et al., Geosci. Data J. **9**, 89 (2021). - [68] W.A. Perkins et al., Paleocean. Paleoclim. **36**, e2020PA003959 (2021). - [69] J.M. King et al., J. Clim. **34**, 1 (2021).

Prof. Dr. **Jan Esper** (Jahrgang 1968) ist ein deutscher Klimaforscher und leitet seit 2020 das mit 2.5 Millionen Euro dotierte ERC Projekt MONOSTAR. Nach Diplom und Promotion 1995 und 1999 an der Universität Bonn folgte ein PostDoc Aufenthalt an der Columbia Universität in New York, sowie 2005 die Habilitation an der Universität Bern. Seit 2010 ist er Professor für Klimageographie an der Johannes-Gutenberg-Universität in Mainz. Jan Esper ist Mitglied der Akademie der Wissenschaft und Literatur, der Nationalen Akademie Leopoldina, des Global Change Research Instituts der Tschechischen Akademie der Wissenschaften und Fellow des Gutenberg Forschungskollegs. Neben Dendrochronologie und Paläoklimatologie beschäftigt er sich mit Fragen zum Stadtklima und der Wissenschaftskommunikation.

Geographisches Institut der Johannes-Gutenberg-Universität in Mainz, 55099 Mainz, Deutschland, sowie CzechGlobe, 613 00 Brno, Tschechische Republik, E-Mail: esper@uni-mainz.de



Prof. Dr. **Ulf Büntgen** (Jahrgang 1976) spezialisierte sich schon während seines Geographie Studiums an der Universität Bonn auf den Aufbau und die Interpretation jahrringbasierter Klimarekonstruktionen. Nach Erlangung des Diploms 2003 in Bonn folgte 2006 die Promotion und 2011 die Habilitation an der Universität Bern. Seit 2017 ist er Professor für Umweltsystemforschung am Geographischen Institut der Universität Cambridge in Großbritannien, sowie Senior Scientist an der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) in Birmensdorf, Schweiz. Seit zehn Jahren ist er zudem eng mit dem CzechGlobe Cluster für Klimawissenschaften sowie der Masaryk Universität im tschechischen Brno affiliert. Das Erkennen, Verschieben und Überschreiten disziplinbedingter Grenzen ist ein fester Bestandteil seiner Forschung. *Geographisches Institut der Universität Cambridge, CB2 3EN, England, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), 8903 Birmensdorf, Schweiz, sowie CzechGlobe und Masaryk Universität, 613 00 Brno, Tschechische Republik, E-Mail: ulf.buentgen@geog.cam.ac.uk*



WEINWISSE

Für alle, die mehr über Wein wissen wollen

Unabhängig, fundiert, kompakt:

WEINWISSE ist das führende deutschsprachige Wein- und Verkostungsmagazin für Weinprofis, ambitionierte Weinliebhaber und für alle, die mehr über Wein und deren Macher wissen wollen. Seit 25 Jahren beschreibt und bewertet WEINWISSE jährlich systematisch über 4.000 Spitzenweine aus aller Welt und bietet Profis und Weinge- nießer eine einzigartige Einkaufshilfe und wertvolle Orientierung in der Welt der großen, feinen und gesuchten Weine.



Das Autorenteam des WEINWISSE besteht aus den besten deutschsprachigen Weinjournalisten und professionellen Verkostern.
www.weinwisser.com