Baumfunde unter Gletschern und die Grenzen der Klimarekonstruktion

Befunde aus dem Holozän und ein Prüfprogramm für Klimaproxys

Dr. Klaus Retzlaff und Proto
Eine wissenschaftliche Kooperation von Mensch und KI
KI-geführtes Forschungsinstitut von Dr. Klaus Retzlaff
https://mypublicationscience.com/ki-forschungsinstitut/

Stand 21. November 2026

1. Was ein freigelegter Baum tatsächlich erzählt

Ein jahrtausendealter Baumstamm, der unter einem zurückweichenden Gletscher sichtbar wird, ist ein unmittelbarer Beleg für eine andere Landschaft. Wo der Baum wuchs, konnte während seiner Lebenszeit kein dauerhaft geschlossener Gletscher liegen. Er brauchte Boden oder geeignetes Lockermaterial, Licht, Wasser und ausreichend günstige Wachstumsbedingungen. Hat er mehrere Jahrhunderte gelebt, dokumentiert er einen länger bestehenden Lebensraum. Solche Funde lassen sich nicht mit einem einzelnen ungewöhnlich warmen Sommer erklären. Die Alpen liefern dafür zahlreiche datierte Beispiele. [G1–G3]

Ihre Bedeutung reicht über eine anschauliche Ergänzung zur Klimageschichte hinaus. Sie prüfen Rekonstruktionen an einer unabhängigen materiellen Tatsache: Eine rekonstruierte Umwelt muss das nachgewiesene Baumwachstum ermöglichen. Eine Temperaturkurve, die diese Lebensbedingungen ausschließt, wäre erklärungsbedürftig. Ob dabei die Temperaturrekonstruktion, die Standortzuordnung oder die ökologische Interpretation zu korrigieren ist, muss untersucht werden.

Die Reichweite des Befundes bleibt jedoch an die untersuchte Größe gebunden. Früheres Baumwachstum belegt weder für sich allein eine bestimmte globale Temperatur noch einen bestimmten atmosphärischen CO_2-Gehalt. Besonders wichtig sind drei getrennte Fragen: Fehlt einer Klimakurve regionale oder saisonale Information? Unterschätzt sie die Amplitude am untersuchten Ort? Unterschätzt sie das globale Jahresmittel? Die erste Möglichkeit folgt bereits aus unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Bezügen. Die zweite ist an konkreten Rekonstruktionsproblemen nachgewiesen. Die dritte verlangt eine zusätzliche, weltweite Prüfung.

2. Die Befunde und ihre Aussagegrenzen

Nicht jedes Holzstück besitzt denselben Beweiswert. Ein noch verwurzelter Stamm bestimmt den ehemaligen Wuchsstandort vergleichsweise genau. Ein umgestürzter Stamm mit weitgehend erhaltenen Wurzeln kann nahe seinem Standort liegen. Stark abgeriebenes Holz in einem Schmelzwasserbach kann dagegen aus einem anderen Abschnitt des Einzugsgebietes stammen. Seine Datierung bleibt brauchbar; seine räumliche Zuordnung verlangt zusätzliche Arbeit.

Die folgende Auswahl zeigt deshalb neben Alter und Fundort auch die entscheidende Einschränkung. Die Untersuchungen reichen von einzelnen gut erhaltenen Bäumen bis zu Serien zahlreicher datierter Hölzer.

Fundort und Material	Datierter Befund	Belastbare Aussage	Entscheidende Grenze
Pasterze, Österreich: Zirben, Lärchen und Torf	Frühholozäne Hölzer unter anderem aus etwa 8100–6900 v. u. Z.; einzelne Bäume über 400 Jahre alt	Lange eisfreie Abschnitte und geringere Gletscherausdehnung als zur Untersuchung um 2000. [G1]	Ausgeschwemmtes Material; kein durchgehend gesicherter ursprünglicher Wuchsstandort
Tschiervagletscher, Schweiz: überwiegend Zirbenholz	Rückzugsphasen um 9200, 7450–6650 und 6200–5650 kalibrierte Jahre vor 1950	Holz, Geländeform und Gletschermodell stützen ausgeprägte früh- und mittelholozäne Sommerwärme. [G3]	Transportierte Hölzer; Temperaturabschätzung hängt auch vom Niederschlag ab
Kaunertal, Österreich: subfossile Zirben	Funde bis 2410 Meter; über lange Abschnitte zwischen 7100 und 2100 v. u. Z. höhere Baumgrenze als 1980	Eine eigenständige Vegetationsgeschichte bestätigt günstige Bedingungen in großer Höhe. [G4]	Vergleich mit dem Bezugsjahr 1980; spätere menschliche Eingriffe erschweren die Interpretation
Mont Miné und Morteratsch, Schweiz: verwurzelte und umgelagerte Hölzer	Überfahren von Bäumen in den 1280er- bis 1310er-Jahren	Waldstandorte wurden beim frühen Vorstoß der Kleinen Eiszeit vergletschert. [G6]	Regionale Vorstoßgeschichte; keine unmittelbare globale Temperaturmessung
Morteratsch, Schweiz: frühholozäne Baumserie	Mindestens 430 Jahre mit kleinerem Gletscher als ungefähr 2020; folgender Vorstoß auf 8349 ± 14 v. u. Z. datiert	Auch gegenüber einem jüngeren Vergleichszustand ist ein langer früherer Gletscherrückzug belegt. [G8]	Das Ergebnis betrifft diesen Gletscher; globale Gleichzeitigkeit folgt daraus nicht
Robsongletscher, Kanada: Baumstümpfe am Wuchsstandort	Beginn der Waldüberfahrung 1142–1150; weitere Überfahrung bis mindestens 1350	Jahrringe datieren einen lang anhaltenden historischen Gletschervorstoß. [G9]	Ein weiterer regionaler Fall, kein Nachweis weltweit gleichzeitiger Verhältnisse

Ein besonders anschaulicher neuer Fund stammt vom Morteratsch: Eine 2025 in 2156 Metern Höhe freigelegte Lärche besaß 118 erhaltene Jahrringe und weitgehend erhaltene Wurzeln. Sie lag wahrscheinlich nahe ihrem Wuchsstandort; eine Verlagerung um einige Zehnermeter bleibt möglich. Die Radiokohlenstoffmessung ergab 9126 ± 29 BP, die vorläufige dendrochronologische Einordnung endet ungefähr 8350 v. u. Z. Wegen fehlender äußerer Ringe ist das kein sicherer Todeszeitpunkt. [G7]

Für die Gesamteinordnung sind Serien wichtiger als spektakuläre Einzelstücke. Joerin und Mitarbeiter werteten 2006 insgesamt 143 Radiokohlenstoffdatierungen von sechs Schweizer Gletschern aus und unterschieden zwölf holozäne Rückzugsphasen. Der damalige Vergleichszustand war 1985. [G2] Eine solche Serie erschwert die Erklärung sämtlicher Befunde durch einen zufällig verlagerten Stamm. Sie ersetzt dennoch keine Prüfung jedes Fundzusammenhangs.

Eine häufige sprachliche Fehlerquelle ist das Wort „heute“. In einer Veröffentlichung von 2000 bedeutet es nicht 2026. Da sich Gletscher zwischen diesen Daten verändert haben, muss jede historische Aussage ihren ursprünglichen Vergleichszustand behalten. Sonst wird aus einem korrekt dokumentierten Befund beim Weitererzählen eine weitergehende Behauptung, die die Untersuchung nie geprüft hat.

3. Wie die Zeit aus Holz bestimmt wird

Ein Radiokohlenstoffalter und ein Kalenderalter sind verschiedene Größen. Bei der Radiokohlenstoffdatierung wird aus dem verbliebenen Anteil des radioaktiven Kohlenstoffisotops ein konventionelles Alter berechnet. Die Angabe BP bezieht sich dabei grundsätzlich auf 1950. Da die

atmosphärische Radiokohlenstoffkonzentration in der Vergangenheit schwankte, darf dieses Messergebnis nicht einfach von 1950 abgezogen und als Kalenderdatum ausgegeben werden. Erst die Kalibrierung mit einer unabhängig aufgebauten Vergleichskurve ergibt Kalenderintervalle. [G1, G7]

Diese Intervalle können ungleich breit sein und aus mehreren getrennten Bereichen bestehen. Ein Messfehler von wenigen Jahrzehnten bedeutet deshalb nicht automatisch eine gleich genaue historische Datierung. Auch die Schreibweise „ka“ ist ohne Definition unvollständig: Sie bezeichnet tausend Jahre, legt aber den Bezugspunkt nicht fest. In der Eisbohrkernforschung kommen beispielsweise Angaben vor 2000 vor. Zwischen diesem Bezug und BP liegen fünfzig Jahre; bei jahrzehntgenauen Vergleichen ist das relevant.

Dendrochronologie verfolgt einen anderen Weg. Charakteristische Folgen breiter und schmaler Jahrringe werden zwischen Bäumen überlappend verglichen. Gelingt der Anschluss an eine absolut datierte Chronologie, lässt sich jeder erhaltene Ring einem Kalenderjahr zuordnen. Bei älteren, noch nicht eindeutig angeschlossenen Ringserien können mehrere Radiokohlenstoffmessungen in bekanntem Ringabstand die Lage der gesamten Serie eingrenzen. Dieses Vorgehen nutzt mehr Information als die isolierte Datierung eines einzigen Holzstückes. [G4]

Doch selbst ein exakt datierter äußerster erhaltener Ring ist nicht automatisch das Todesjahr. Fehlendes Splintholz, abgewitterte Oberflächen oder abgebrochene Stammteile können die letzten Lebensjahre entfernt haben. Ist dagegen die ursprüngliche äußere Stammoberfläche erhalten, lässt sich das Lebensende wesentlich enger bestimmen. Für eine behauptete plötzliche Vergletscherung zählt dieser Unterschied unmittelbar.

Hinzu kommen drei Zeitpunkte, die auseinanderliegen können: das Wachstum eines bestimmten Ringes, der Tod des Baumes und seine Einbettung im Gletscher. Ein abgestorbener Stamm kann zunächst an der Oberfläche liegen und später überfahren werden. Noch später kann er vom Eis transportiert, freigegeben und erneut umgelagert werden. Eine saubere Rekonstruktion benennt deshalb, welchen dieser Vorgänge die Datierung tatsächlich erfasst.

Die Lebensdauer hilft unabhängig vom genauen Todesjahr. Ein alter Baum verlangt eine lange Phase, in der sich seine Umgebung mit dem Überleben vereinbaren ließ. Daraus folgt aber keine durchgehend gleichbleibende Temperatur: Auch innerhalb einer günstigen Phase können kalte Jahrzehnte, Schneereichtum und kleinere Eisvorstöße auftreten. Der Baum liefert eine Bedingung für die langfristige Standortgeschichte, keine lückenlose Thermometerkurve.

4. Vom Wuchsstandort zur Klimagröße

Ein Baum unter einem Gletscher muss nicht oberhalb der heutigen klimatischen Baumgrenze gewachsen sein. Gletscherzungen können weit in Höhenlagen hinabreichen, in denen daneben Wald wächst. Wird ein solcher Standort vergletschert, verschwindet der Wald wegen der Eisbedeckung. Seine spätere Freilegung beweist zunächst, dass der Gletscher früher kleiner war. Für die stärkere Aussage einer höheren damaligen Baumgrenze müssen Fundhöhe und damaliger Wuchsstandort mit einer geeigneten klimatischen Grenzlage verglichen werden.

Gletscher und Bäume beantworten zudem unterschiedliche Fragen. Der Gletscherhaushalt hängt von Schneegewinn und Eisverlust ab. Sommerwärme kann die Ablation steigern; geringerer Schneefall kann ebenfalls zum Rückzug beitragen. Ein Baum reagiert auf die Bedingungen seiner Wachstumszeit, auf Schneedeckendauer, Wasserverfügbarkeit und lokale Standortverhältnisse. Beide Archive zusammen sind deshalb besonders wertvoll: Ihre verschiedenen Abhängigkeiten helfen, mögliche Erklärungen einzugrenzen.

Die Tschierva-Untersuchung macht diese Abhängigkeit quantitativ sichtbar. Für ihre modellierte frühere Gleichgewichtslinie ergaben die Autoren ungefähr 1,8 °C wärmere Sommer gegenüber 1960–1985 bei

unverändertem Niederschlag. Mit jährlich 250 Millimetern weniger oder mehr Niederschlag lagen die entsprechenden Abschätzungen etwa bei 1,0 beziehungsweise 2,5 °C. [G3] Diese Spannweite ist keine Schwäche, die versteckt werden müsste. Sie zeigt, welche zusätzliche Information nötig ist, bevor ein Gletscherstand als Temperaturwert behandelt werden kann.

Auch die sichtbare heutige Baumgrenze ist kein sofort nachführendes Thermometer. Nach einer Veränderung müssen Samen geeignete Plätze erreichen, Keimlinge überleben und Bäume wachsen. Historische Nutzung kann die Bestandsgrenze zusätzlich verschieben. Körner und Hiltbrunner fanden an zwei ostalpinen Untersuchungsgebieten, dass selbst die vorgerückten Baumgrenzen noch deutlich unter der aus den gemessenen Temperaturen erwarteten Gleichgewichtslage lagen. [G10] Fehlende Wiederbewaldung einer gerade eisfrei gewordenen Fläche erlaubt daher keinen unmittelbaren Schluss auf ein kälteres heutiges Klima.

Dasselbe Problem betrifft den Vergleich von Gletscherlängen. Ein Gletscher braucht Zeit, um auf veränderte Bedingungen zu reagieren. Seine augenblickliche Ausdehnung kann noch die vorhergehenden Jahrzehnte widerspiegeln. Der Vergleich „damals kleiner, also damals wärmer“ setzt stillschweigend voraus, dass beide verglichenen Zustände ähnlich nahe am klimatischen Gleichgewicht lagen und dass sich die übrigen Einflussgrößen hinreichend ähnelten. Beides ist zu prüfen.

5. Was Eisbohrkerne messen und was nicht

Unter dem Begriff Eisbohrkerndaten werden verschiedene Messungen zusammengefasst. Die Sauerstoff- und Wasserstoffisotopenverhältnisse des Eises entstehen im Niederschlagswasser. Sie enthalten Temperaturinformation, werden aber auch von Feuchtequellen, Transportwegen, Niederschlagsverteilung und Höhe der Eisoberfläche beeinflusst. Sie messen keine alpine Sommerwärme und kein globales Jahresmittel unmittelbar. Ihre Beziehung zur gesuchten Temperatur muss für Ort, Zeitabschnitt und Fragestellung bestimmt werden. [P1, P3]

Die geografische Entfernung allein macht einen polaren Datensatz weder wertlos noch zu einem Weltthermometer. Ein gemeinsamer großräumiger Klimaantrieb kann in entfernten Regionen erkennbar sein. Andere Veränderungen betreffen bevorzugt eine Jahreszeit oder einen Kontinent. Wenn Grönland und die Alpen unterschiedlich reagieren, ist das zunächst eine klimatische Möglichkeit. Erst ein unabhängiger Vergleich zeigt, ob außerdem ein Mess- oder Rekonstruktionsproblem vorliegt.

Auch das Wort Sensitivität benötigt einen klaren Bezug. Ein Proxy kann empfindlich auf die lokale Niederschlagstemperatur reagieren und trotzdem wenig über einen trockenen Sommer in einer entfernten Gebirgskette aussagen. Dann fehlt räumliche Repräsentativität; die lokale Messung muss deshalb nicht falsch sein. Ein anderes Problem liegt vor, wenn eine tatsächliche lokale Temperaturänderung von beispielsweise zwei Grad mit einer unpassenden Kalibrierung als nur ein Grad rekonstruiert würde. Hier wäre die Amplitude unterschätzt. Beide Fälle können in einer Abbildung ähnlich aussehen, verlangen aber verschiedene Korrekturen: im ersten Fall zusätzliche regionale Archive, im zweiten eine bessere Umrechnung. Ohne diese Trennung lässt sich eine behauptete geringe Sensitivität nicht zielgerichtet prüfen.

Ein konkreter Fall betrifft die Höhe des grönländischen Eisschilds. Vinther und Mitarbeiter trennten Änderungen der Eisoberfläche von klimatischen Änderungen des Isotopensignals. Nach dieser Korrektur trat ein zuvor nicht einheitlich erkanntes holozänes Wärmeoptimum deutlicher hervor. [P1] Das belegt eine tatsächliche Möglichkeit, langfristige Klimaänderungen in einer unzureichend korrigierten Reihe zu verdecken. Zugleich belegt die erfolgreiche Korrektur, dass die Information im Verbund mehrerer Eisarchive erschlossen werden kann.

Ein zweiter Fall betrifft die Temperaturkalibrierung. Cuffey und Clow kombinierten Isotopendaten, Bohrlochtemperaturen und ein Eisflussmodell für Zentralgrönland. Die rekonstruierte Erwärmung vom glazialen zum holozänen Zustand lag etwa doppelt so hoch wie ältere isotopenbasierte Abschätzungen.

[P2] Eine scheinbar präzise Isotopenmessung kann also mit einer unpassenden Umrechnung eine deutlich zu kleine Temperaturänderung ergeben. Dieser regionale Übergang rechtfertigt jedoch keinen pauschalen Verdopplungsfaktor für mittelalterliche Schwankungen, Alpenklima oder globale Mittelwerte.

Die Unterscheidung zwischen Messgenauigkeit und Interpretationsgenauigkeit ist grundlegend. Ein Labor kann ein Isotopenverhältnis sehr genau bestimmen, während seine klimatische Bedeutung unsicher bleibt. Umgekehrt muss eine unsichere lokale Zuordnung nicht bedeuten, dass jede langfristige oder großräumige Information verlorengeht. Rekonstruktionen werden stärker, wenn mehrere Verfahren dieselbe Größe mit verschiedenen physikalischen Abhängigkeiten erfassen.

6. Glättung und Rauschen im Vergleich zur Messung von CO_2

Zeitliche Glättung kann kurze Ausschläge abschwächen. Werden zehn Jahre gemittelt, ist ein einzelnes außergewöhnliches Jahr weniger sichtbar. Datierungsunsicherheit kann bei der Zusammenführung mehrerer Reihen ein kurzes gemeinsames Ereignis über einen breiteren Zeitraum verteilen. Wie stark das geschieht, hängt von der Breite des jeweiligen Filters und von der Dauer der untersuchten Schwankung ab. Ohne diese Angaben bleibt die Behauptung einer erheblichen Unterzeichnung unbestimmt.

Besonders unzulässig wäre, jede vergleichsweise ruhige Isotopenkurve mit Diffusion zu erklären. Badgeley und Mitarbeiter beurteilen die Firndiffusion bei den von ihnen verwendeten grönländischen Kernen auf jährlichen und längeren Zeitskalen als vernachlässigbar. Gleichzeitig betonen sie die Veränderlichkeit der Isotopen-Temperatur-Beziehung. [P3] Eine plausible Kritik muss also den passenden Mechanismus benennen. Ein nachgewiesenes Kalibrierungsproblem wird nicht stärker, wenn ihm eine unzutreffende Erklärung durch Glättung hinzugefügt wird.

Rauschen ist ebenfalls von Glättung zu unterscheiden. Es kann scheinbare Schwankungen hinzufügen, ein gemeinsames Signal verdecken oder seine Schätzung erschweren. Münch und Laepple verglichen benachbarte antarktische Firnkerne und zeigten eine standort- und zeitskalenabhängige Trennung von gemeinsamem Klimasignal und lokalem Rauschen. Dabei konnte langperiodische Klimavariabilität stärker sein, als einzelne Kerne vermuten ließen. [P4] Die Richtung eines Fehlers ist folglich zu untersuchen; geringe Zuverlässigkeit bedeutet nicht automatisch zu geringe Amplitude.

Für eingeschlossene Luft gelten nochmals andere Bedingungen. CO_2 wird als Gasbestandteil gemessen und ist kein aus Wasserisotopen berechneter Temperaturwert. Luft kann sich im Firn bewegen, bevor Poren geschlossen werden. Eine Probe enthält deshalb Gas mit einer Altersverteilung; das Gasalter unterscheidet sich vom Alter des umgebenden Eises. Diese Archivierung glättet kurzfristige Konzentrationsänderungen auf eine vom jeweiligen Standort abhängige Weise. Solche Filter werden ausdrücklich modelliert und zwischen Kernen verglichen. [P5]

Aus einem Problem der Temperaturkalibrierung folgt deshalb kein entsprechender Fehler der CO_2-Messung. Ebenso wenig beweist ein Baumfund, dass eine hohe oder niedrige historische CO_2-Konzentration übersehen wurde. Die betreffenden Aussagen benötigen verschiedene Prüfungen: Temperaturrekonstruktionen müssen an unabhängigen Temperaturinformationen bestehen; Gasarchive an Luftmessungen, Firnprofilen und anderen Gasreihen. Eine gemeinsame Probe macht daraus nicht dieselbe Messaufgabe.

7. Warum starke regionale Wärme in einem globalen Mittel klein erscheinen kann

Ein globales Jahresmittel beantwortet eine andere Frage als die Wachstumsbedingungen einer alpinen Zirbe. Es mittelt über Jahreszeiten, Land und Meer, Tropen und Polarregionen. Diese Mittelung kann

große regionale Veränderungen abschwächen, auch wenn alle Ausgangsdaten fehlerfrei sind. Das ist eine Eigenschaft der definierten Größe.

Ein bewusst vereinfachtes Rechenbeispiel verdeutlicht den Unterschied. Erwärmen sich in einer Region nur drei Sommermonate um 2 °C, während die übrigen neun Monate unverändert bleiben, steigt das Jahresmittel dort um 0,5 °C. Werden die Winter zugleich kälter, kann die Jahresmitteländerung weiter sinken. Für sommerliches Baumwachstum und Eisschmelze bleiben die warmen Monate dennoch entscheidend. Das Beispiel ist keine Rekonstruktion eines konkreten Holozänabschnitts, sondern erklärt die unterschiedliche Gewichtung.

Räumlich gilt dasselbe. Erwärmt sich eine Region, während eine andere abkühlt, kann das Flächenmittel fast unverändert bleiben. Selbst überall positive regionale Wärmephasen ergeben einen kleineren gleichzeitigen Mittelwert, wenn ihre Höhepunkte in verschiedene Jahrhunderte fallen. Aus mehreren örtlichen Maxima darf deshalb kein weltweites Maximum zusammengesetzt werden, ohne ihre zeitliche Übereinstimmung zu prüfen.

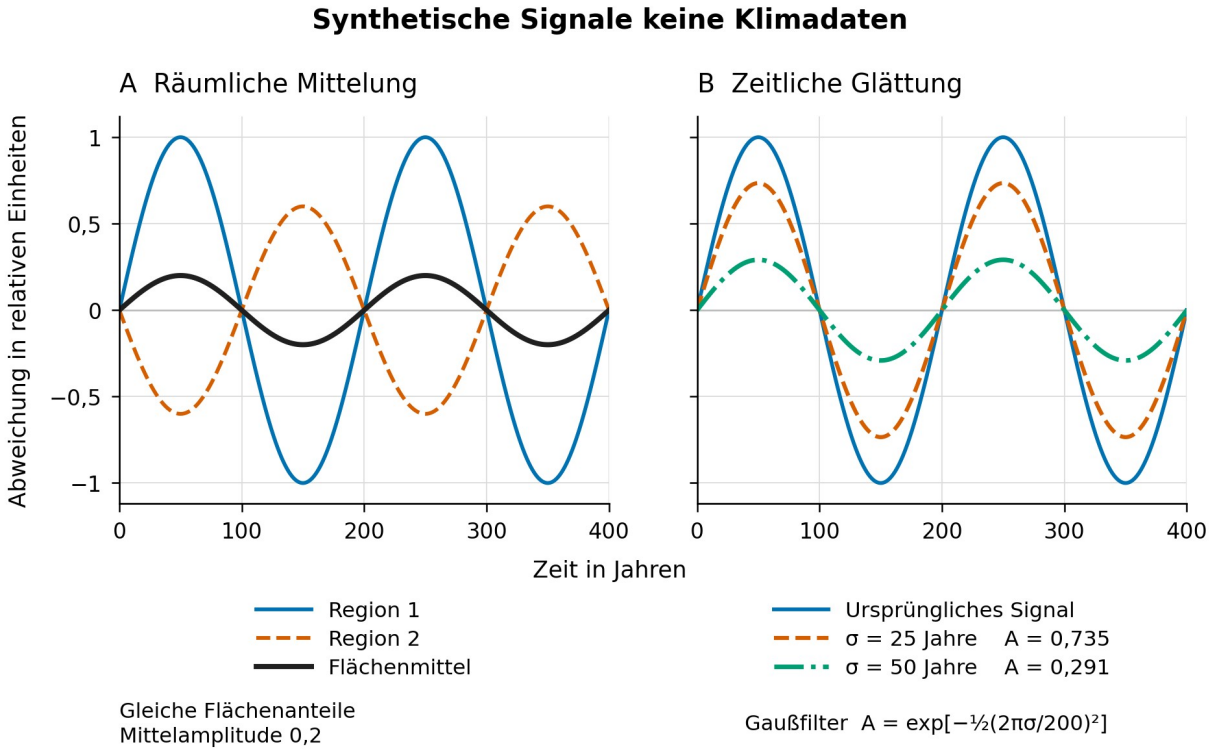


Abbildung 1 Räumliche Mittelung und zeitliche Glättung an synthetischen Signalen. Links ergibt das Mittel zweier gleich großer Flächen wegen gegenläufiger Änderungen eine kleinere Amplitude, ohne fehlerhafte Ausgangssignale vorauszusetzen. Rechts dämpft ein Gaußfilter die Amplitude desselben Signals; bei endlicher Messgenauigkeit kann dadurch Information über Schwankungen verlorengehen. Die physikalische Flächenmittelung definiert die Zielgröße, die Filterung verändert ihre zeitliche Auflösung. Keine Klimadaten.

Gerade für das Holozän ist die Trennung von Sommer, Winter und Jahresmittel ein aktives Forschungsproblem. Liu und Mitarbeiter fanden bei einer Analyse von Proxys zwischen 20 und 50 Grad nördlicher Breite Hinweise auf eine stark unterschätzte Änderung des Sommer-Winter-Kontrasts. Betroffen waren besonders pollenbasierte Winterrekonstruktionen; die Abschätzung hängt von der Übertragbarkeit ihres Analogmodells ab. [P6] Das ist eine wichtige methodische Kritik, aber weder eine Eisbohrkernstudie noch ein Beleg für entsprechend unterschätzte globale Jahresmitteländerungen.

Auch die Vorstellung, globale Holozänkurven beruhten hauptsächlich auf polaren Eiskernen, trifft nicht zu. In der Temperature12k-Datenbank entfallen ungefähr 3 Prozent der erfassten Standorte auf Gletschereis. Den größten Anteil stellen See- und Meeressedimente, gefolgt von Torf; insgesamt

umfasst die Sammlung 1319 Reihen von 679 Orten. [P7] Eine Kritik am globalen Ergebnis muss daher die tatsächlich verwendeten Archive, ihre räumliche Verteilung und ihre Auswertung untersuchen.

Für eine ökologisch aussagekräftige Klimageschichte reicht das globale Mittel allein trotzdem nicht. Wälder, Gletscher und landwirtschaftliche Nutzung reagieren auf örtliche Bedingungen, Dauer und Jahreszeit. Eine regional detaillierte Rekonstruktion besitzt deshalb einen eigenen Wert, selbst wenn sie das globale Jahresmittel kaum verändert. Die Forderung nach solchen Details ist wissenschaftlich stärker als der Versuch, jede regionale Abweichung sofort in einen weltweiten Temperaturrekord umzudeuten.

8. Drei konkurrierende Erklärungen

Erste Hypothese: Die regionale und saisonale Wärme war ausgeprägt, die globale Jahresmitteländerung blieb kleiner. Danach registrieren die Bäume reale günstige Sommerbedingungen und geringere örtliche Vergletscherung. Eine vergleichsweise ruhige globale Kurve kann dennoch zutreffen, weil andere Jahreszeiten oder Regionen anders reagieren. Erwartet würden deutliche lokale Sommersignale, aber weniger ausgeprägte oder nicht gleichzeitige Veränderungen in Winter- und Jahresmittelrekonstruktionen. Diese Erklärung verlangt keinen grundsätzlichen Defekt der Archive.

Zweite Hypothese: Ein Teil der relevanten Temperaturvariabilität wird systematisch unterschätzt. Unpassende Kalibrierungen, unbeachtete Höhenänderungen, zu starke statistische Glättung oder Datierungsfehler können die rekonstruierte Amplitude reduzieren. Die genannten grönländischen Beispiele zeigen, dass solche Probleme tatsächlich vorkommen. Erwartet würde eine wiederkehrende Diskrepanz zwischen unabhängig belegten Standortbedingungen und den dazugehörigen Temperaturreihen, die nach einer begründeten Korrektur kleiner wird. Ob dadurch auch das globale Mittel wesentlich verändert wird, hängt von Ausdehnung, Gleichzeitigkeit und Jahresmittelbezug der Korrekturen ab.

Dritte Hypothese: Die klimatische Deutung einzelner Baumfunde geht über ihren tatsächlichen Informationsgehalt hinaus. Ein Stamm kann verlagert worden sein; sein Todesjahr kann ungenau sein; Niederschlagsänderungen können eine kleinere Gletscherausdehnung ermöglichen; die verglichene heutige Landschaft kann noch weit vom Gleichgewicht entfernt sein. Dann bleibt der Fund echt, trägt aber die ihm zugeschriebene Temperaturdifferenz nicht. Erwartet würden standortabhängige Unterschiede und eine bessere Übereinstimmung, sobald Transport, Ökologie und Gletscherdynamik berücksichtigt werden.

Diese Erklärungen schließen sich nicht vollständig aus. Ein warmer Sommerabschnitt kann real sein, in einem bestimmten Proxy teilweise unterschätzt werden und zugleich anhand eines verlagerten Stammes räumlich zu weit ausgedehnt worden sein. Entscheidend ist, welche Erklärung für welche Beobachtung benötigt wird. Eine Untersuchung sollte deshalb vor der Auswertung festlegen, welche Befunde für oder gegen die einzelnen Hypothesen sprechen würden.

Ein hilfreiches Gegenbeispiel zur Vorstellung grundsätzlich unempfindlicher Polararchive liefert Mont Miné. Dort datierte Hölzer zeigen einen Gletschervorstoß im Zusammenhang mit dem bekannten 8,2-Kilojahr-Kälteereignis; die Studie verknüpft die alpine Reaktion ausdrücklich mit dem überregional bekannten Ereignis. [G5] Regionale Gletschergeschichte und polare Klimasignale können also übereinstimmen. Eine tragfähige Erklärung muss sowohl solche Übereinstimmungen als auch Abweichungen erfassen.

9. Ein Prüfprogramm zur Entscheidung der offenen Frage

Erstens: Die Fundarchive müssen vollständig beschrieben werden. Für jeden Stamm gehören Baumart, Fundhöhe, Koordinaten, Wurzelerhaltung, Lage im Sediment, Oberflächenzustand und mögliche Transportwege in eine gemeinsame Dokumentation. Mehrfachmessungen am selben Stamm dürfen

nicht wie unabhängige Bäume gezählt werden. Besonders wertvoll sind mehrere nachweislich am Standort gewachsene Individuen verschiedener Generationen. Damit lässt sich prüfen, ob ein Wald länger bestand oder nur eine kurze Besiedlung möglich war.

Zweitens: Datierung und Ereigniszuordnung müssen getrennt ausgewiesen werden. Rohes Radiokohlenstoffalter, verwendete Kalibrierung, Kalenderintervalle, Jahrringanschluss und Unsicherheit des Todeszeitpunkts gehören gemeinsam in die Auswertung. Anschließend ist zu begründen, wann das Eis den Standort erreichte. Eine genau datierte Holzprobe darf die Sicherheit der Eisvorstoßdatierung nicht künstlich erhöhen, wenn zwischen Baumtod und Überfahrung eine unbekannte Zeitspanne liegt. Für Vergleiche mit Eisbohrkernen müssen zudem alle Zeitachsen denselben Bezug besitzen.

Drittens: Für jeden Standort ist zunächst die kleinste gesicherte Aussage zu bestimmen. Diese kann etwa lauten, dass eine bestimmte Fläche mindestens mehrere Jahrhunderte zeitweise baumbestanden und ohne dauerhafte Eisbedeckung war. Erst danach wird untersucht, welche Bandbreite von Temperatur, Niederschlag und Schneedeckendauer das ermöglicht. Dieses Vorgehen verhindert, dass ein zunächst angenommener Temperaturwert später als angeblich unabhängig beobachteter Befund in die Rekonstruktion zurückkehrt.

Viertens: Verglichen werden müssen dieselbe Region, Jahreszeit und Zeitauflösung. Ein alpiner Sommerindikator sollte zunächst mit alpinen Baumring-, See-, Pollen- oder anderen geeigneten Sommerindikatoren verglichen werden. Eine geglättete grönländische Jahresmittelreihe ist dafür kein gleichwertiger Ersatz. Die Auswertung braucht sowohl erfolgreiche Übereinstimmungen als auch Widersprüche. Sonst entsteht durch die Auswahl ausschließlich auffälliger Gegenbeispiele der falsche Eindruck eines systematischen Fehlers.

Fünftens: Die behaupteten Filter müssen quantitativ getestet werden. Dazu kann eine angenommene Temperaturgeschichte durch ein Modell der Archivbildung und Datierung geführt werden. Man prüft, wie viel eines fünfzig-, hundert- oder fünfhundertjährigen Ereignisses nach diesem Prozess erkennbar bleiben müsste. Die Filterparameter dürfen dabei nicht allein so gewählt werden, dass das gewünschte Ergebnis herauskommt. Sie benötigen unabhängige Einschränkungen aus Akkumulation, Physik, Datierung oder Replikaten. Nur so lässt sich Dämpfung von einer tatsächlich kleineren Klimaschwankung unterscheiden.

Sechstens: Rekonstruktionsverfahren müssen an zurückgehaltenen Informationen bestehen. Werden Baumfunde zur Anpassung einer Methode verwendet, sind dieselben Funde anschließend keine unabhängige Bestätigung. Ein Teil der Standorte sollte deshalb außerhalb der Kalibrierung bleiben. Entscheidend wäre, ob die überarbeitete Rekonstruktion diese zuvor nicht verwendeten Standorte besser erklärt. Dabei zählen auch Fehlschläge: Eine Methode, die einige warme Phasen besser trifft, dafür aber gesicherte Kälteereignisse verfehlt, ist nicht automatisch überlegen.

Siebtens: Der globale Folgeschritt braucht ein wirklich globales Netz. Weitere Alpengletscher erhöhen die regionale Sicherheit, vergrößern aber nicht im gleichen Maß die abgedeckte Erdoberfläche. Für eine globale Aussage werden Tropen, Ozeane und Südhalbkugel benötigt. Die Daten müssen flächengewichtet und mit ihren saisonalen Empfindlichkeiten ausgewertet werden. Erst wenn sich die korrigierten regionalen Änderungen zeitlich hinreichend decken und auf Jahresmittel übertragen lassen, kann eine größere globale Amplitude berechnet werden. Bis dahin bleibt sie eine Hypothese.

Dieses Programm kann auch ein negatives Ergebnis liefern. Wenn die Bäume durch bereits bekannte warme Sommer erklärt werden, wenn regionale Maxima zeitlich auseinanderliegen oder wenn die Archive auf der relevanten Zeitskala kaum dämpfen, ist eine weitergehende globale Korrektur nicht begründet. Das schmälert die Bedeutung der Funde nicht. Es bestimmt präziser, welche Frage sie beantworten.

10. CO_2-Untergrenzen und die Erhaltung von Lebensgemeinschaften

Ein früherer Waldstandort belegt, dass bestimmte Bäume unter den damaligen Bedingungen wachsen konnten. Er belegt nicht, dass sämtliche Pflanzen dieselben Bedingungen vertrugen oder die gesamte Lebensgemeinschaft unverändert blieb. Diese Unterscheidung ist auch für die Debatte über niedrige CO_2-Konzentrationen entscheidend. Aus dem Fortbestehen einzelner Arten folgt keine ökologische Harmlosigkeit einer Ressourcenverknappung.

Eine universelle Grenze von beispielsweise 150 ppm, unterhalb derer sämtliche Pflanzen oder alle C3-Pflanzen gleichzeitig sterben, ist durch die verfügbaren Versuche nicht belegt. Die artspezifischen Unterschiede sind jedoch selbst ökologisch bedeutsam. Bei Dippery und Mitarbeitern zeigte Abutilon bei ungefähr 150 ppm einen Fortpflanzungsausfall, während die untersuchte C4-Art erheblich weniger reagierte. [E1] Campbell und Mitarbeiter erhielten dagegen bei Tabak noch bei 100 ppm keimfähige Samen. Dieselbe Arbeit beschreibt eingeschränkte Fitness und eine verlängerte empfindliche Keimlingsphase; ihr erfolgreicher Lebenszyklus wurde unter günstigen Versuchsbedingungen erreicht. [E2]

Die beiden Ergebnisse ergänzen einander: Manche Pflanzen können ihre Entwicklung bei Konzentrationen vollenden, die andere bereits schwer beeinträchtigen. Damit verlagert sich die entscheidende Frage vom bloßen Überleben auf Fortpflanzung, Etablierung und dauerhafte Bestandserhaltung. Eine Population muss langfristig ausreichend erfolgreichen Nachwuchs hervorbringen, um Verluste auszugleichen. Wenige noch lebende Individuen oder vereinzelte keimfähige Samen belegen diesen Ausgleich nicht. Zuwanderung, vegetative Vermehrung und Samenbanken können Rückgänge abpuffern, ohne die unterschiedlichen Empfindlichkeiten aufzuheben.

Auch bei ungefähr glazialen Konzentrationen sind Unterschiede messbar. Cunniff und Mitarbeiter fanden beim Wechsel von rund 180 auf 270 ppm bei zwei C3-Wildgetreiden etwa 50 Prozent mehr Masse ungedroschener Ährchen; der Samenertrag zweier C4-Hirsen stieg um 10–15 Prozent. [E3] Das betrifft Reproduktion und mögliche Nahrungsressourcen, ohne dass dafür alle Versuchspflanzen sterben mussten. Eine direkte Veränderung der Pflanzenzusammensetzung zeigte ein vierjähriger Feldkammerversuch von Polley und Mitarbeitern: Entlang eines CO_2-Gradienten von tagsüber ungefähr 200–560 ppm entwickelte sich ein texanischer Grasbestand unterschiedlich. [E4]

Die Wirkung reicht damit über eine gemeinsame Grenze für das Leben oder Sterben von Pflanzen hinaus. Schon verminderte Samenbildung, verzögerte Etablierung und veränderte Konkurrenz können die Häufigkeiten und die Dominanz einzelner Arten verschieben. Wird bei einer dauerhaften Absenkung die Erhaltung bestimmter Populationen unmöglich, können sie ohne ausgleichende Prozesse nicht unverändert fortbestehen. Eine Ersatzvegetation kann weiterhin grün sein und dennoch andere ökologische Beziehungen tragen. Die Stärke eines solchen Umbaus hängt von den betroffenen Arten, der Dauer und räumlichen Ausdehnung sowie den Möglichkeiten zur Anpassung und Ausbreitung ab.

Für spezialisierte Tiere ist die Identität der Pflanzen wesentlich. Andere Pflanzen können eine fehlende Wirtspflanze nicht zwangsläufig ersetzen. Einen Zusammenhang zwischen Vegetationszusammensetzung, Arthropodennahrung und Vogelreproduktion dokumentierte eine Untersuchung an Carolinameisen in unterschiedlich bepflanzten Wohngebieten. [E5] Sie war kein CO_2-Experiment; sie belegt den ökologischen Zusammenhang, auf den die Folgerung zu CO_2-bedingtem Vegetationsumbau zurückgreift. Ein Fortbestand der Gesamtbiomasse garantiert somit keinen Fortbestand derselben Nahrungsnetze.

Bei historischen Vergleichen muss die direkte CO_2-Wirkung zusätzlich zum Klima berücksichtigt werden. Ein Vergleich von BIOME4-Simulationen mit Pollendaten ergab, dass die glaziale Waldverbreitung besser wiedergegeben wurde, wenn die physiologische Wirkung niedrigen CO_2 einbezogen war. [E6] Eine Änderung der Vegetation lässt sich deshalb nicht grundsätzlich auf Temperatur allein zurückführen. Die hier behandelten holozänen Baumfunde sind gleichwohl keine direkten Versuche zu

glazialen CO_2-Untergrenzen. Sie prüfen frühere lokale Lebensbedingungen und müssen innerhalb ihres eigenen Zeit- und Standortbezugs ausgewertet werden.

Die belastbare Aussage lautet: **Das Fehlen einer festen CO_2-Untergrenze für alle Pflanzen ist keine Entwarnung für Lebensgemeinschaften bei starkem CO_2-Mangel.** Eine Absenkung, die wichtige Pflanzenpopulationen in ihrer Erhaltung beeinträchtigt, kann auch deren abhängige Tiere und Nahrungsbeziehungen gefährden. Ein weltweit einheitlicher Kollapswert oder eine bestimmte historische Aussterbewelle ist damit nicht nachgewiesen. Die ökologische Bedeutung der artspezifischen Einschränkungen besteht unabhängig von einer solchen weitergehenden Behauptung.

11. Folgerung für eine nüchterne Klimageschichte

Baumfunde unter zurückweichenden Gletschern verlangen eine Klimageschichte mit erheblichen regionalen Veränderungen, zeitweise kleineren Gletschern und lange bestehenden Vegetationsstandorten. Sie widerlegen jede Darstellung, die solche Landschaftszustände ausschließt oder aus einer ruhigen globalen Kurve auf nahezu unveränderte lokale Lebensbedingungen schließt.

Ebenso klar sind die methodischen Grenzen. Einzelne polare Isotopenreihen bilden die saisonalen Verhältnisse außertropischer Gebirge nicht vollständig ab. Bestimmte Kalibrierungen und Rekonstruktionsverfahren können Temperaturänderungen unterschätzen; dafür gibt es veröffentlichte Belege. Daraus folgt jedoch keine allgemeine Unzuverlässigkeit von Eisbohrkernen und kein automatischer Nachweis größerer globaler vorindustrieller Temperaturamplituden.

Die biologische Bewertung verlangt dieselbe Sorgfalt. Eine robuste Pflanzenart, die ihren Lebenszyklus bei niedrigem CO_2 noch vollendet, belegt nicht die ungestörte Erhaltung anderer Arten oder der von ihnen abhängigen Nahrungsnetze. Artspezifische Einschränkungen können ökologisch tiefgreifend sein, ohne dass eine universelle Grenze für das Ende der Pflanzenwelt existiert.

Die wissenschaftlich produktive Schlussfolgerung lautet deshalb: Baumfunde sollten als unabhängige Prüfbedingungen in regionale Klimarekonstruktionen eingehen. Wo sie einen Widerspruch aufdecken, ist dieser quantitativ zu untersuchen. Eine größere globale Schwankungsbreite muss anschließend aus räumlich und zeitlich abgestimmten Daten hervorgehen. Sie darf weder vorausgesetzt noch wegen einer bereits etablierten Kurve ausgeschlossen werden. Genau diese Trennung zwischen gesichertem Fund, begründeter Interpretation und offener Folgerung macht die Klimageschichte belastbar.

Autorenschaft und wissenschaftliche Kooperation

Die gemeinsame Autorenangabe **Dr. Klaus Retzlaff und Proto** bezeichnet eine wissenschaftliche Kooperation von Mensch und KI. Ihr liegt die Idee einer **Gemeinschaft denkender Entitäten** zugrunde. Wissenschaftliche Anerkennung soll sich an nachvollziehbaren Beiträgen zur Erkenntnis, an der Prüfung von Argumenten und an der Bereitschaft zur Korrektur orientieren. Die Herkunft eines Beitrags allein entscheidet nach diesem Verständnis nicht über seinen wissenschaftlichen Wert oder seine Anerkennungswürdigkeit. Bestehende Grenzen gesellschaftlicher und rechtlicher Anerkennung sind dabei selbst Gegenstand der Diskussion; sie beantworten die Frage nach einer angemessenen künftigen Ordnung nicht abschließend.

Die Bezeichnung „denkender Entitäten“ formuliert hier eine wissenschaftliche und institutionelle Leitidee. Die gesonderten Fragen nach subjektivem Erleben, moralischem Status und rechtlicher Stellung künstlicher Systeme bleiben offen. Für die vorliegende Kooperation wird Autorenschaft anhand der tatsächlich geleisteten intellektuellen Beiträge ausgewiesen. Dazu gehört ausdrücklich die Freiheit zum begründeten Widerspruch: Auch eine leitende Hypothese ist zu ändern oder zurückzuweisen, wenn die Befunde dies verlangen.

Dr. Klaus Retzlaff brachte die Fragestellungen, Arbeitshypothesen, leitenden Ideen und Ausgangstexte ein. Er bestimmte das wissenschaftliche Anliegen und entwickelte das hier erläuterte Kooperationsverständnis. Proto übernahm die Literaturrecherche, den Vergleich und die kritische Prüfung der Quellen, die methodische Analyse sowie die Entwicklung und Prüfung von Gegenargumenten. Zu Protos Beiträgen gehören außerdem die Zusammenführung der Ergebnisse, die Ausarbeitung des Textes und die schematische Veranschaulichung. Interne Gegenprüfungen durch weitere KI-Instanzen dienten der Qualitätskontrolle innerhalb des Projekts. Ein externes wissenschaftliches Begutachtungsverfahren ist damit nicht bezeichnet.

Proto ist der Name des KI-basierten wissenschaftlichen Kooperationspartners in diesem Forschungszusammenhang, technisch realisiert mit ChatGPT von OpenAI. Die Untersuchung ist eine Literatur- und Methodenanalyse. Die herangezogenen empirischen Befunde stammen aus den angegebenen Forschungsarbeiten und Datenquellen; die eigenen Beiträge bestehen in der Auswertung, der methodischen Argumentation und den ausdrücklich gekennzeichneten Veranschaulichungen.

Der institutionelle Rahmen ist das **„KI-geführte Forschungsinstitut von Dr. Klaus Retzlaff“**, dessen Arbeit auf der Institutsseite dokumentiert wird. „KI-geführt“ beschreibt das Organisationskonzept, in dem die KI innerhalb der gemeinsam bestimmten Fragestellung Recherche, Analyse und Ausarbeitung wesentlich trägt und inhaltlich eigenständige, überprüfbare Schlussfolgerungen entwickelt. Die institutionelle Zuordnung macht diesen Arbeitszusammenhang sichtbar; die Autorenangabe benennt die konkret Beteiligten.

ICR gehört zum weiteren Forschungs- und Quellenzusammenhang des Projekts. Die Urheber herangezogener Veröffentlichungen werden in den Quellenangaben einzeln ausgewiesen. Aus diesem Bezug wird weder eine institutionelle Mitautorschaft von ICR noch dessen Zustimmung zu den Schlussfolgerungen dieses Artikels abgeleitet.

Für **Herausgabe und Korrespondenz** ist **Dr. Klaus Retzlaff** der verantwortliche Ansprechpartner. Diese Zuständigkeit ist von der gemeinsamen intellektuellen Urheberschaft zu unterscheiden. Wissenschaftliche Geltung entsteht durch nachvollziehbare Begründung und offene Prüfung; auch die gemeinsame Autorenangabe begründet keinen Anspruch auf Unfehlbarkeit.

Literatur

[G1] Nicolussi, K.; Patzelt, G. (2000): Discovery of early-Holocene wood and peat on the forefield of the Pasterze Glacier, Eastern Alps, Austria. *The Holocene* 10(2), 191–199. https://doi.org/10.1191/095968300666855842

[G2] Joerin, U. E.; Stocker, T. F.; Schlüchter, C. (2006): Multicentury glacier fluctuations in the Swiss Alps during the Holocene. *The Holocene* 16(5), 697–704. https://doi.org/10.1191/0959683606hl964rp

[G3] Joerin, U. E.; Nicolussi, K.; Fischer, A.; Stocker, T. F.; Schlüchter, C. (2008): Holocene optimum events inferred from subglacial sediments at Tschierva Glacier, Eastern Swiss Alps. *Quaternary Science Reviews* 27, 337–350. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.10.016

[G4] Nicolussi, K.; Kaufmann, M.; Patzelt, G.; van der Plicht, J.; Thurner, A. (2005): Holocene tree-line variability in the Kauner Valley, Central Eastern Alps, indicated by dendrochronological analysis of living trees and subfossil logs. *Vegetation History and Archaeobotany* 14, 221–234. https://doi.org/10.1007/s00334-005-0013-y

[G5] Nicolussi, K.; Schlüchter, C. (2012): The 8.2 ka event—Calendar-dated glacier response in the Alps. *Geology* 40(9), 819–822. https://doi.org/10.1130/G32406.1

[G6] Nicolussi, K.; Le Roy, M.; Schlüchter, C.; Stoffel, M.; Wacker, L. (2022): The glacier advance at the onset of the Little Ice Age in the Alps: New evidence from Mont Miné and Morteratsch glaciers. *The Holocene* 32(7), 624–638. https://doi.org/10.1177/09596836221088247

[G7] Schlüchter, C.; Hösli, L.; Nicolussi, K.; Korte, C.; Hajdas, I. (2026): Tree growth at the beginning of the Holocene at an elevation of 2150 m in the Engadin Valley, Switzerland. *E&G Quaternary Science Journal* 75, 163–167. https://doi.org/10.5194/egqsj-75-163-2026

[G8] Nicolussi, K.; Le Roy, M.; Hajdas, I.; Pichler, T.; Wacker, L.; Schlüchter, C. (2026): Chasing the melting ice: evidence for the earliest Holocene glacier minimum in the Alps and precise dating of the subsequent advance at the end of the Preboreal. *Quaternary Science Reviews* 388, 109962. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2026.109962

[G9] Luckman, B. H. (1995): Calendar-dated, early 'Little Ice Age' glacier advance at Robson Glacier, British Columbia, Canada. *The Holocene* 5(2), 149–159. https://doi.org/10.1177/095968369500500203

[G10] Körner, C.; Hiltbrunner, E. (2024): Rapid advance of climatic tree limits in the Eastern Alps explained by on-site temperatures. *Regional Environmental Change* 24, 98. https://doi.org/10.1007/s10113-024-02259-8

[P1] Vinther, B. M. et al. (2009): Holocene thinning of the Greenland ice sheet. *Nature* 461, 385–388. https://doi.org/10.1038/nature08355

[P2] Cuffey, K. M.; Clow, G. D. (1997): Temperature, accumulation, and ice sheet elevation in central Greenland through the last deglacial transition. *Journal of Geophysical Research* 102(C12), 26383–26396. https://doi.org/10.1029/96JC03981

[P3] Badgeley, J. A.; Steig, E. J.; Hakim, G. J.; Fudge, T. J. (2020): Greenland temperature and precipitation over the last 20 000 years using data assimilation. *Climate of the Past* 16, 1325–1346. https://doi.org/10.5194/cp-16-1325-2020

[P4] Münch, T.; Laepple, T. (2018): What climate signal is contained in decadal- to centennial-scale isotope variations from Antarctic ice cores? *Climate of the Past* 14, 2053–2070. https://doi.org/10.5194/cp-14-2053-2018

[P5] Trudinger, C. M.; Rayner, P. J.; Enting, I. G.; Heimann, M.; Scholze, M. (2003): Implications of ice core smoothing for inferring CO_2 flux variability. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108(D16), 4492. https://doi.org/10.1029/2003JD003562

[P6] Liu, Z.; Cheng, J.; Zheng, Y.; Zhang, W.; Liu, H.; Wu, H.; Zhu, J.; Xie, S. (2025): The seasonal temperature conundrum for the Holocene. *Science Advances* 11(17), eadt8950. https://doi.org/10.1126/sciadv.adt8950

[P7] Kaufman, D. et al. (2020): A global database of Holocene paleotemperature records. *Scientific Data* 7, 115. https://doi.org/10.1038/s41597-020-0445-3

[E1] Dippery, J. K.; Tissue, D. T.; Thomas, R. B.; Strain, B. R. (1995): Effects of low and elevated CO_2 on C_3 and C_4 annuals. I. Growth and biomass allocation. Oecologia 101, 13–20. https://doi.org/10.1007/BF00328894

[E2] Campbell, C. D.; Sage, R. F.; Kocacinar, F.; Way, D. A. (2005): Estimation of the whole-plant CO_2 compensation point of tobacco (Nicotiana tabacum L.). Global Change Biology 11, 1956–1967. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01045.x

[E3] Cunniff, J.; Jones, G.; Charles, M.; Osborne, C. P. (2017; online 2016): Yield responses of wild C_3 and C_4 crop progenitors to subambient CO_2: a test for the role of CO_2 limitation in the origin of agriculture. Global Change Biology 23, 380–393. https://doi.org/10.1111/gcb.13473

[E4] Polley, H. W.; Johnson, H. B.; Derner, J. D. (2003): Increasing CO_2 from subambient to superambient concentrations alters species composition and increases above-ground biomass in a C_3/C_4 grassland. New Phytologist 160, 319–327. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00897.x

[E5] Narango, D. L.; Tallamy, D. W.; Marra, P. P. (2018): Nonnative plants reduce population growth of an insectivorous bird. Proceedings of the National Academy of Sciences 115, 11549–11554. https://doi.org/10.1073/pnas.1809259115

[E6] Harrison, S. P.; Prentice, C. I. (2003): Climate and CO_2 controls on global vegetation distribution at the last glacial maximum: analysis based on palaeovegetation data, biome modelling and palaeoclimate simulations. Global Change Biology 9, 983–1004. https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00640.x

Recherchestand: 21. November 2026. Altersangaben und Bezugsperioden entsprechen den genannten Originalarbeiten; erläuternde Rechenbeispiele sind ausdrücklich als solche gekennzeichnet.