Baumgrenzen und historische Zeugnisse früherer Wärmephasen

Temperaturbedingungen und Zivilisationsgeschichte in Alpen Himalaja Anden und nordamerikanischen Hochgebirgen

Dr. Klaus Retzlaff und Proto

Eine wissenschaftliche Kooperation von Mensch und KI

KI-geführtes Forschungsinstitut von Dr. Klaus Retzlaff

22. November 2026 | Version 01

Zusammenfassung

Datierte Hochlagenbäume und historische Überlieferungen eröffnen zwei sich ergänzende Zugänge zu früheren Wärmephasen. Baumfunde können örtliche Bedingungen für langjähriges Wachstum und bei geeigneter Kalibrierung saisonale Temperaturdifferenzen begrenzen. Historische Quellen ergänzen unabhängig datierte Beobachtungen zu Ernten, Landwirtschaft, Hochgebirgsnutzung und Gletscherständen. Der Vergleich von Alpen, Himalaja, Anden und nordamerikanischen Hochgebirgen zeigt reale frühere regionale Wärmehinweise, aber unterschiedliche Möglichkeiten ihrer Quantifizierung. Im Kaunertal erlaubt ein 155 m über der Referenzbaumgrenze von etwa 1980 eingeordneter Zirbenstamm eine bedingte sommerliche Abschätzung in der Größenordnung eines Grades; seine Lebenszeit überschneidet sich mit archäologischer Passnutzung am Schnidejoch. Für Beartooth liegt eine lokale saisonale Rekonstruktion vor. Dayara, Naleng und Marcacocha ergänzen zeitlich und räumlich andere Vegetations- und Klimaphasen. Schriftquellen sind vor allem für jüngere Jahrhunderte dicht. Ihre Verknüpfung mit Naturarchiven verlangt gleiche Regionen, passende Jahreszeiten und wirklich unabhängige Datierungen. Hochlagenbesiedlung allein ist kein Thermometer, weil Kulturpflanzen und Technik die Nutzungsmöglichkeiten verändern. Zwei Zeitachsen, Rechenbeispiele und eine vergleichende Quellenbewertung machen sichtbar, welche regionalen Aussagen bereits tragfähig sind und welche Daten für eine gemeinsame globale Temperaturinterpretation noch fehlen.

Schlüsselwörter: Baumgrenze; Holozän; historische Klimatologie; Vegetationszeit; Hochgebirgsarchäologie; regionale Wärmephasen

Erstes Kapitel Fragestellung und Vorgehen

Frühere Bäume an heute baumfreien Hochgebirgsstandorten sind unmittelbare Zeugnisse einer anderen Umwelt. Ihr Wert für die Temperaturgeschichte wächst, wenn Art, Wuchsform, ursprünglicher Standort, Lebenszeit und die zum Vergleich verwendete Baumgrenze bekannt sind. Historische Überlieferungen können dazu eine zweite Perspektive liefern: Sie beschreiben Ernten, Anbaugrenzen, Frost, Wasserverfügbarkeit, Passnutzung und Gletscherstände. Der vorliegende Bericht prüft, welche dieser Beobachtungen tatsächlich gemeinsam eine frühere Wärmephase begrenzen.

Die Untersuchung behandelt Alpen, Himalaja, Anden und nordamerikanische Hochgebirge. Das Tibetische Hochland und seine östlichen Randgebirge werden als benachbarter Vergleichsraum ausdrücklich gekennzeichnet. Ebenso wird ein patagonischer Gletscher mit tief reichender Zunge von einer tropischen Hochlagenbaumgrenze unterschieden. Eine räumliche Zuordnung allein nach dem Kontinent würde ökologisch sehr verschiedene Beobachtungen miteinander vermengen.

Recherchiert wurden Originalarbeiten, verfügbare Volltexte und Supplemente, zugängliche historische Texte sowie institutionell archivierte Autorenfassungen. Die Suche kombinierte Baumgrenze, subfossiles Holz, Höhenlage, Vegetationszeit, historische Landwirtschaft und Gletschergeschichte mit den Namen der Gebirge und Fundorte. Vertieft wurden Quellen mit überprüfbaren Höhen, Datierungen oder ausdrücklich beschriebenen historischen Belegen. Der Stand ist der 22. November 2026. Es handelt sich um eine kritische, international vergleichende Literaturuntersuchung; eine vollständige systematische Erfassung sämtlicher Archive wurde nicht durchgeführt.

Die Quellen werden an denselben Kriterien gemessen, gleichgültig, ob ihre Ergebnisse starke frühere Wärme, spätere Abkühlung oder jüngste Erwärmung betonen. Zu prüfen sind Datengrundlage, Datierung, physikalischer Zusammenhang, alternative Standortfaktoren und die tatsächliche Unabhängigkeit der Belege. Ein Finanzierungszusammenhang allein entscheidet diese Fragen nicht. Ein Nachweis von Förderasymmetrien würde zusätzlich Daten zu Anträgen, Entscheidungen und nicht veröffentlichten Untersuchungen erfordern.

Drei Ergebnisse werden auseinandergehalten: erstens die direkt beobachtete Tatsache, zweitens die daraus unter benannten Voraussetzungen abgeleitete Temperaturbedingung und drittens die weitergehende Deutung einer regionalen oder überregionalen Wärmephase. Dadurch bleiben starke Einzelbefunde erhalten, ohne ihre Reichweite durch eine unpassende Vergleichsgröße zu überdehnen.

Zweites Kapitel Welche Temperaturbedingungen Baumwachstum voraussetzt

Die Vegetationszeit ist die relevante Vergleichsgröße

Die obere klimatische Baumgrenze hängt eng mit der Wärme während der Wachstumszeit zusammen. Körner und Paulsen untersuchten 46 Standorte zwischen 68° nördlicher und 42° südlicher Breite. Nach Ausschluss anders begrenzter Waldsäume betrug die mittlere Bodentemperatur der Vegetationszeit 6,7 °C bei einer Streuung von 0,8 °C. Diese Streuung beschreibt die untersuchten Standorte; sie ist kein Vertrauensintervall für eine einzelne historische Temperatur. Gemessen wurde im Wurzelraum, nicht die globale Jahresmitteltemperatur. [1]

Eine spätere Modellierung von 376 natürlichen Baumgrenzen ergab eine gemeinsam angepasste Kombination: mindestens 94 Tage Vegetationszeit und durchschnittlich 6,4 °C während der Tage mit einem Tagesmittel über 0,9 °C. Diese Zahlen sind Modellparameter für potenzielle klimatische Baumgrenzen. Sie dürfen weder als drei voneinander unabhängige Naturkonstanten noch als Mindesttemperatur jedes einzelnen Tages gelesen werden. Auch ist ein so definierter Vegetationsmittelwert nicht automatisch mit einem Juni–August-Mittel vergleichbar. [2]

Damit lässt sich die zentrale positive Aussage präzisieren: Ein langlebiger, am ursprünglichen Standort nachgewiesener Baum belegt, dass die örtlichen Bedingungen über längere Zeit genügend Wachstum zuließen. Mit einer passenden lokalen Kalibrierung kann daraus eine thermische Untergrenze oder ein Temperaturbereich abgeleitet werden. Aus dem bloßen Vorhandensein des Baumes entsteht jedoch keine obere Temperaturgrenze. Sein späteres Fehlen kann außerdem durch Eis, Störung, Nutzung oder unzureichende Wiederbesiedlung verursacht sein.

Baumform und Standort müssen zusammenpassen

Ein geschlossener Waldsaum, die obersten aufrechten Bäume und einzelne bodennahe Jungpflanzen sind verschiedene Grenzen. Bodennahe Pflanzen können ein anderes Mikroklima nutzen als eine mehrere Meter hohe Krone. Für den historischen Vergleich müssen daher entsprechende Wuchsformen verglichen werden. Auch eine Artgrenze kann tiefer liegen als die Grenze, an der überhaupt noch Bäume existieren könnten. Körner und Hoch unterscheiden entsprechend die potenzielle klimatische Grenze von der tatsächlich besetzten Grenze, die zusätzlich Landnutzung und andere lokale Einflüsse enthält. [3]

Die Anden zeigen die Bedeutung der konkreten Messgröße. Am Sajama wuchsen Polylepis-Bäume bis etwa 4810 m. Für die 265 Tage dauernde, meteorologisch definierte Vegetationszeit 2003/04 wurden unter den Bäumen in 10 cm Bodentiefe 5,4 ± 0,1 °C gemessen. Die höchsten Bäume erreichten 3,3 m. Dieser Befund belegt Baumwachstum unter diesen lokalen Bedingungen. Er ist kein allgemeiner Beweis, dass alle Baumarten bei genau 5,4 °C ihre Grenze erreichen. [4]

An peruanischen Polylepis-Standorten wurden zudem andere Luft- und Bodenmittel sowie unterschiedliche Vegetationszeiten festgestellt. Die für den jeweiligen Messaufbau gewählten Zeitabschnitte und die Erwärmung durch Strahlung beeinflussen den Zahlenvergleich. Eine globale Regel ist daher ein sinnvoller Ausgangspunkt; die engere historische Temperaturbedingung verlangt eine Art- und Standortkalibrierung. [5]

Tabelle 1 Reichweite verschiedener Pflanzenbelege. Die Aussagen in der dritten Spalte sind Schlussfolgerungsregeln dieser Untersuchung.

Beobachtung	Unmittelbar belegt	Thermische Aussage
Mehrere alte Bäume am Wuchsort	Längerfristiges Wachstum und zeitweilige Eisfreiheit	Bedingte Untergrenze für örtliche Wachstumsbedingungen
Baum oberhalb einer vergleichbaren klimatischen Grenze	Mindestens diese frühere Höhenbesiedlung	Temperaturdifferenz bei passendem lokalen Höhengradienten
Holz in ursprünglicher Wuchslage unter einer Gletscherzunge	Frühere Vegetation im später überfahrenen Gelände	Ohne Zusatzdaten keine Temperaturzahl und keine höhere Baumgrenze
Transportiertes Holz am Eisrand	Alter und Art des gefundenen Holzes	Ursprüngliche Höhe und örtliche Eisgeschichte zunächst offen
Pollen in einem See	Vegetation im Einzugs- und Transportgebiet	Rekonstruktion benötigt Herkunfts- und Klimamodell

Drittes Kapitel Von der Höhenlage zur Temperaturdifferenz

Für zwei vergleichbare klimatische Baumgrenzen lässt sich die Höhenverschiebung näherungsweise in eine saisonale Temperaturdifferenz übersetzen. Dabei bezeichnet Δz die frühere minus die für einen

angegebenen Zeitraum geltende Referenzhöhe. Γ ist die positive Abnahme der relevanten Temperatur mit der Höhe. Die bedingte Beziehung lautet:

$\Delta T \approx \Gamma \times \Delta z$

Bei Γ = 0,006 °C/m entsprechen 100 Höhenmeter rechnerisch 0,6 °C. Die Rechnung ist einfach; ihre sachliche Berechtigung hängt von der Referenz ab. Entscheidend sind dieselbe Hanglage, ein vergleichbarer Schnee- und Wasserhaushalt, die passende Jahreszeit und die Unterscheidung von klimatischer und durch Nutzung abgesenkter Baumgrenze. Eine Standardrate von 0,6 °C je 100 m ersetzt keine lokale Messung.

Ein einzelner früher Baum kann unter geeigneten Voraussetzungen eine Mindestverschiebung anzeigen: Die damalige obere Grenze lag wenigstens so hoch wie sein Wuchsort. Das Wort „mindestens“ betrifft zunächst die Höhe. Es darf erst dann auf eine Temperaturdifferenz übertragen werden, wenn die Vergleichsgrenze und die thermische Interpretation gesichert sind. War die heutige Bestandsgrenze durch Rodung abgesenkt oder folgt sie der Erwärmung erst verzögert, ergibt der Höhenvergleich keine belastbare Mindestdifferenz zur heutigen Lufttemperatur.

Die rechnerische Spannweite zweier angenommener Höhengradienten ist außerdem kein statistisches Konfidenzintervall. Ein solches Intervall müsste zusätzlich Fehler der Höhenbestimmung, zeitliche Unsicherheit, Variabilität des lokalen Gradienten, die ökologische Streuung und die Unsicherheit der Referenzgrenze enthalten. Diese Beiträge sind oft korreliert. Ohne ihre Erfassung wäre ein präziser Fehlerbalken irreführend.

Tabelle 2 Nachvollziehbare Höhenrechnungen. Die erste Zeile wird im Alpenkapitel belegt; die lokalen Andengradienten stammen aus Kessler et al. [5]. Alle Spannweiten sind Sensitivitätsbereiche und keine Vertrauensintervalle.

Rechnung	Eingesetzte Werte	Ergebnis	Status
Kaunertal KG-7	155 m; 0,6–0,7 °C je 100 m	0,93–1,09 °C	Bedingte Rechnung; Bezug zum älteren Referenzklima
Allgemeines Beispiel	100 m; 0,5–0,7 °C je 100 m	0,50–0,70 °C	Nur Sensitivität angenommener Gradienten
Anden Beispiel	200 m; gemessene 0,43–0,55 °C je 100 m	0,86–1,10 °C	200 m sind hypothetisch; kein nachgewiesener alter Anstieg

Auch der Bezugszeitraum gehört zur Zahl. „Ein Grad wärmer als das Referenzklima 1920–1980“ beantwortet eine andere Frage als „ein Grad wärmer als die jüngsten Jahrzehnte“. Die Differenz lässt sich ohne aktuelle Messreihe am passenden Standort nicht einfach übernehmen. Ebenso kann ein Sommer wärmer sein, während der Jahresmittelwert durch einen kälteren Winter weniger stark oder in die andere Richtung verändert wird.

Viertes Kapitel Was historische Überlieferungen ergänzen

Historische Quellen sind besonders wertvoll, wenn sie unabhängig vom Naturarchiv datiert sind und einen klaren Bezug zu einer Klimagröße besitzen. Eine jährlich notierte Ernte kann nach Prüfung von Sorte, Ort und Wirtschaftsweise die Wärmeentwicklung einer Vegetationsperiode abbilden. Ein Bericht über einen vereisten Pass belegt zunächst die damalige Passsituation. Ein Text über Frostschäden enthält eine Temperaturinformation, aber noch keinen Mittelwert für ein Jahrhundert.

Für den Vergleich werden vier Quellenarten getrennt. Zeitgenössische Schriftzeugnisse dokumentieren Beobachtungen annähernd zur Zeit des Ereignisses. Spätere Chroniken überliefern ältere Ereignisse und

benötigen eine zusätzliche Prüfung ihrer Quellen und Datierung. Archäologische Funde belegen menschliche Tätigkeit und können unabhängig datiert sein, enthalten aber keine unmittelbar aufgeschriebene Wetterbeobachtung. Pollen, Holz und Sedimente bleiben Naturarchive, auch wenn ihre Auswertung die Geschichte eines Reiches behandelt.

Diese Unterscheidung bewahrt den Eigenwert nichtschriftlicher Geschichte. Das Fehlen einer zeitgleichen schriftlichen Temperaturbeschreibung entwertet weder Archäologie noch mündliche Überlieferung. Für die konkrete Untersuchung begrenzt es jedoch, welche Aussage als unabhängig datierter historischer Wärmebeleg eingesetzt werden kann. Eine nicht geprüfte Erzählung wird hier nicht nachträglich in eine präzise Klimaangabe umgedeutet.

Auch die Unabhängigkeit hat mehrere Ebenen. Zwei Messgrößen aus demselben Sedimentkern können verschiedene Umweltprozesse anzeigen, teilen aber meist das Altersmodell. Ein aus Pollen erschlossener Anbauanstieg und eine aus denselben Pollen erschlossene Erwärmung ergeben keine zwei unabhängigen Temperaturbeweise. Unabhängiger wäre ein archivalisch datierter Erntekalender aus derselben Region, dessen Zusammenhang mit Temperatur separat kalibriert wurde.

Hochlagenbesiedlung ist ein bedingter Klimaindikator. Menschen können Kälte durch Kulturpflanzenwechsel, Bewässerung, Wärmespeicherung im Boden, saisonale Nutzung und Versorgung aus tieferen Lagen ausgleichen. Ein belastbarer Schluss auf frühere Wärme verlangt deshalb möglichst dieselbe Pflanze, vergleichbare Anbautechnik, eine bestimmte Höhenlage und einen Nachweis, dass die entsprechende Nutzung unter dem Referenzklima thermisch nicht mehr möglich wäre. Ohne diese Angaben bleibt die Besiedlung ein Beleg für menschliche Handlungsmöglichkeiten.

Fünftes Kapitel Alpen

Ein mehrere Jahrhunderte gewachsener Baum auf 2400 Metern

Im inneren Kaunertal ordnen Nicolussi und Mitarbeiter die Zirbe KG-7 einem Wuchsort auf 2400 m zu. Ihre dendrochronologisch eingeordnete Ringfolge reicht von 4674 bis 4377 v. Chr.; erhalten sind mindestens 298 Lebensjahre. Der Stamm stammt aus einem Moorstandort. Eine ausdrücklich erhaltene Verwurzelung dieses Exemplars ist im geprüften Text nicht ausgewiesen. Die von den Autoren verwendete Referenzbaumgrenze lag um 1980 bei 2245 m. Daraus ergibt sich für KG-7 ein Höhenunterschied von 155 m. [6]

Mit der in der Arbeit diskutierten sommerlichen Temperaturabnahme von 0,6–0,7 °C je 100 m ergeben diese 155 m rechnerisch 0,93–1,09 °C. Die Autoren schätzen für die höchsten Phasen des gesamten Fundbestandes, mit bis zu 165 m Höhenunterschied, mindestens etwa 1 °C höhere Sommertemperaturen gegenüber ungefähr 1920–1980. Die Ringfolge dokumentiert langes Wachstum; die Gradzahl entsteht erst durch die Höheninterpretation. Beides muss getrennt bleiben. [6]

Dieser Befund ist deutlich stärker als die bloße Meldung von Holz am Rand eines schmelzenden Gletschers: Baumart, Höhe und jahrgenaue Lebenszeit sind miteinander verknüpft. Eine unabhängig überprüfte ursprüngliche Wuchslage würde die räumliche Zuordnung weiter stärken. Zugleich betrifft der Vergleich ein älteres Referenzklima. Er beantwortet nicht unmittelbar die Frage, ob es am selben Ort wärmer als in den jüngsten Jahrzehnten war.

Die Bedeutung einer datierten Referenz zeigt eine Untersuchung von 2024 an anderen Ostalpenstandorten. Dort wurden inzwischen über zwei Meter hohe Zirben um 2500 m beschrieben und eine Verzögerung zwischen thermisch möglichen und tatsächlich erreichten Baumhöhenlagen untersucht. Diese Beobachtung aktualisiert den Kaunertaler Standort nicht direkt. Sie zeigt aber, warum eine für 1980 angegebene Grenze nicht dauerhaft als unveränderte Gegenwart gelten kann. [8]

Die Verbindung zur frühen menschlichen Hochgebirgsnutzung

Am Schnidejoch in den Schweizer Alpen auf 2756 m sind archäologische Funde einer frühen Nutzungsphase von etwa 4800–4300 v. Chr. zugeordnet. Dazu gehört eine Ulmenholzschale mit einer Datierung um 4500–4300 v. Chr. Dieser Zeitraum überschneidet sich mit KG-7. Die archäologische Datierung entsteht aus anderen Gegenständen an einem anderen Standort; sie ergänzt die Baumchronologie durch einen kulturgeschichtlichen Beleg. [7]

Der gemeinsame Befund lautet: In zeitlich überlappenden Abschnitten waren im Kaunertal langjähriges Baumwachstum in großer Höhe und am Schnidejoch menschliche Passnutzung möglich. Die Entfernung zwischen den Orten und der unterschiedliche Beobachtungsinhalt begrenzen die Folgerung. Eine getragene Holzschale belegt keinen Ulmenwald auf 2756 m. Passnutzung verlangt auch keine ganzjährige Eisfreiheit. Die Kombination ist dennoch informativ, weil zwei unabhängig datierte Archive günstige ökologische beziehungsweise praktische Bedingungen in verschiedenen Alpenräumen anzeigen.

Mittelalterliche Gletscherbäume und spätere Schriftquellen

Vom Mont-Miné-Gletscher sind Lärchen dokumentiert, die im späten Jahr 1285 beziehungsweise im Sommer 1293 vom Eis getötet wurden. Am Morteratsch beschriebene verwurzelte Stümpfe ergänzen den Nachweis älterer Vegetation vor einem Gletschervorstoß. Diese Befunde tragen eine genaue lokale Gletschergeschichte. Ihre Lage im Gletschertal macht sie jedoch noch nicht zu Messungen einer erhöhten thermischen Baumgrenze. Ohne passende Wuchshöhe wird deshalb keine Gradzahl eingesetzt. [9]

Die schriftliche Überlieferung wird für die jüngeren Jahrhunderte wesentlich dichter. Wetter und Pfister rekonstruierten März–Juli-Temperaturen aus Roggenerntedaten von 1454–1970. Zu den konkreten Quellen zählen Zahlungen für Erntearbeit in den Ausgabenbüchern des Basler Spitals, ergänzt durch weitere archivalische Teilserien. Die Arbeit kalibriert die phänologischen Daten an instrumentellen Temperaturen und vergleicht sie bereits mit dem Unteren Grindelwald- und dem Aletschgletscher. Damit liegt eine tatsächlich ausgeführte Verknüpfung von Schrift- und Naturarchiven vor. [10]

Die historische Reihe beginnt allerdings Jahrtausende nach den höchsten Kaunertaler Baumphasen. Sie kann deren Temperatur nicht schriftlich bestätigen. Ihr Nutzen liegt im jüngeren gemeinsamen Zeitfenster: Ernteentwicklung und Gletscherverlauf lassen sich unter Beachtung unterschiedlicher Jahreszeiten und Reaktionsverzögerungen vergleichen. Die Gletscherkurven werden dabei aus vorhandenen Studien übernommen und durch erneute Darstellung nicht zu neuen unabhängigen Beobachtungen.

Kalenderprüfung und das ungewöhnliche Jahr 1540

Die Schweizer Weinleserekonstruktion wurde später auf 1444–2011 erweitert und korrigiert. Wetter und Pfister weisen auf eine fehlende Umrechnung julianischer Daten in der älteren Arbeit von Meier und Mitarbeitern hin; dadurch war der frühere Abschnitt zu warm ausgefallen. Die ältere und die überarbeitete Serie teilen Ausgangsdaten. Sie dürfen weder additiv als zwei Bestätigungen gezählt noch ohne Berücksichtigung der Korrektur gegeneinander ausgewertet werden. [11, 12]

Für 1540 berichten historische Texte außergewöhnlich frühe Traubenentwicklung und starke Trockenheit. Ein reguläres Schweizer Lesedatum fehlt. Aus narrativen Reifehinweisen schätzen Wetter und Pfister bedingt auf angenommene Reifetermine eine April–Juli-Anomalie von +4,7 bis +6,8 °C gegenüber 1901–2000. Der angegebene Regressionsfehler von ±0,5 °C deckt die historischen und extrapolativen Unsicherheiten nicht vollständig ab. Diese hohe Zahl ist deshalb eine publizierte Schätzung unter konkreten Annahmen, keine nachträgliche Thermometermessung. [11]

Orth und Mitarbeiter gelangen mit historischen Trockenheitstagen und einer anderen Modellmethode zu einer vorsichtigeren Rangfolge: Für das mitteleuropäische Juni–August-Mittel schätzen sie höchstens 20 % Wahrscheinlichkeit, dass 1540 wärmer als 2003 war; für höhere Tagesmaxima nennen sie 40–70 %. Auch diese Schätzung ist unsicher und verwendet teilweise dieselbe historische Ausgangsbasis. Außerdem vergleichen beide Arbeiten verschiedene Jahreszeiten. Gesichert bleibt die außergewöhnliche regionale Hitze und Dürre; eine eindeutige Rangfolge aller saisonalen Mittel ist damit nicht erreicht. [13]

1540 ist somit ein geeigneter Prüfstein für historische Extremwärme und die Empfindlichkeit unterschiedlicher Rekonstruktionsmethoden. Als einzelnes Jahr kann es keine jahrhundertelange Baumgrenzenphase erklären. Die Alpen liefern vielmehr zwei unterschiedlich starke Verbindungen: lange alte Baumchronologien mit archäologischer Hochgebirgsnutzung und jüngere, dichter dokumentierte Kombinationen aus Erntephänologie und Gletscherverlauf.

Sechstes Kapitel Himalaja und die benachbarten tibetischen Hochländer

Moderne Kalibrierung und tatsächlich beobachtete Grenzen

Für das Rolwaling-Tal in Nepal liegt eine mehrjährige Untersuchung der Bodenbedingungen an der Baumgrenze vor. Müller und Mitarbeiter berichten für die Vegetationszeit 7,5 ± 0,6 °C in 10 cm Tiefe. Die zugehörige Dissertation benennt die Vegetationsperioden 2013–2015. Die im zugänglichen Text nicht ausreichend erläuterte statistische Bedeutung von ±0,6 wird hier nicht als 95%-Intervall verwendet. Bereits der Unterschied zum Sajama macht deutlich, weshalb Art, Vegetationsdauer und Messumgebung zur Temperaturzahl gehören. [14]

Eine Studie an 211 Birken aus neun oberen Waldgrenzenstandorten zwischen 3900 und 4150 m zeigt einen starken Einfluss des Niederschlags im Vormonsun auf das Jahrringwachstum. Das widerlegt eine thermische Obergrenze der Baumform nicht. Es verhindert aber, jeden schmalen Jahrring ungeprüft als Kälteanzeiger zu behandeln. Eine zweite Untersuchung an 20 Flächen in Nepal ermittelte für etwa 150 Jahre Baumgrenzenanstiege zwischen 0 und 56 m; acht Flächen blieben weitgehend stationär. Die räumlichen Unterschiede hängen auch mit Frühjahrsfeuchte zusammen. [15, 16]

Dayara als lokaler Befund aus dem Zentralhimalaja

Eine 2026 erschienene Arbeit untersucht eine Moorsequenz der Dayara-Wiese auf ungefähr 3430 m im oberen Bhagirathi-Becken. Pollen, Kohlenstoffisotope und magnetische Parameter werden als Hinweise auf warm-feuchte Phasen vor etwa 6100–5300, 3400–1600 und 1000–500 Kalenderjahren vor 1950 gedeutet. Für die älteste Phase folgern die Autoren eine Baumgrenze oberhalb der heutigen Position. Die jüngste dieser älteren Phasen entspricht ungefähr 950–1450 n. Chr. [17]

Der Befund ist räumlich relevant und erweitert den Vergleich um den Himalaja im engeren Sinn. Er ist bisher jedoch nur anhand des Originalabstracts quantitativ geprüft. Vier Radiokohlenstoffdaten tragen die etwa 6100-jährige Folge; eine Meterdifferenz, eine Gradzahl und vollständige Altersmodellintervalle sind dort nicht angegeben. Der Bericht übernimmt deshalb die Phasen als qualitative Regionalbefunde. Die breite Zeitangabe darf nicht mit einer entsprechenden Datierungspräzision verwechselt werden. [17]

Ein andersartiger Test stammt vom Gangotri-Gletscher. Alte lebende Birken bei Bhojbasa reichen bis 1571 zurück und begrenzen damit die mögliche spätere Eisüberdeckung ihres Standortes. Das kann eine aus anderen Karten oder Erzählungen abgeleitete Gletscherposition korrigieren. Es handelt sich um Baumstandorte neben dem Gletscher und um horizontale Eisrandveränderung; eine frühere höher gelegene klimatische Baumgrenze wird damit nicht beziffert. [24]

Naleng als deutliches Beispiel aus Osttibet und dem Hengduan-Gebirge

Am 4200 m hoch gelegenen Naleng-See rekonstruieren Kramer und Mitarbeiter offene Tannen-Birken-Wälder zwischen etwa 10.700 und 4400 cal BP, mit einem Rückzug zwischen etwa 8100 und 7200 cal BP. Die veröffentlichte Interpretation nennt eine 400–600 m höhere Baumgrenze und ungefähr 2–3 °C wärmere Bedingungen als in der damaligen Vergleichsgegenwart. Der Standort gehört zum Hengduan-Gebirge am südöstlichen Tibetischen Hochland. Er wird hier ausdrücklich nicht als Fund aus dem Himalaja bezeichnet. [18]

Die Größenordnung ist ein ernst zu nehmender Hinweis auf ausgeprägte früh- und mittelholozäne regionale Wärme. Ihre Genauigkeit ist in dieser Fassung begrenzt: Saison, moderne Bezugsperiode und Fehlerverteilung der Gradangabe wurden mangels vollständigen Originalzugriffs nicht abschließend geprüft. Eine spätere Untersuchung sedimentärer DNA stärkt die Vegetationsgeschichte desselben Sees. Sie teilt jedoch dessen Datierungsprobleme und verwendet externe Temperaturreihen zur

Habitatmodellierung. Das Modell ist somit keine unabhängige zweite Messung derselben alten Temperatur. [19]

Tibetische Reichsgeschichte und landwirtschaftliche Möglichkeiten

Für Zentraltibet setzt Hou und Mitarbeiter die Entwicklung des Tibetischen Reiches mit Naturarchiven aus dem Jiang Co in Beziehung. Alkenone und weitere Sedimentmerkmale sprechen in ihrer Interpretation für warm-feuchte Bedingungen um 600–800 n. Chr. Die getrennt datierte politische Geschichte ermöglicht einen Vergleich mit Landwirtschaft und Expansion. Die Temperaturinformation selbst stammt aus dem See. Der Aufstieg des Reiches wird dadurch nicht zu einer zweiten Temperaturmessung. [20]

Eine historische Auswertung von Zou und Mitarbeitern nennt für etwa 839–841 in später überlieferten Chroniken Frost, Dürre, Ernteprobleme und Hunger in Tibet. Die Texte, darunter das Testament of Ba und der Clear Mirror on Royal Genealogy, sind hinsichtlich ihrer Entstehungs- und Überlieferungszeit zu unterscheiden. Besonders der Clear Mirror ist eine viel spätere Kompilation. Die Berichte liefern konkrete Belastungshinweise. Ein vorangehender regionaler Temperaturmittelwert oder seine Amplitude folgt daraus nicht. Zudem dürfen darin besprochene Ereignisse aus China und der Mongolei nicht als lokale tibetische Beobachtungen gezählt werden. [21]

Die Archäologie liefert einen wichtigen Mechanismustest. Chen und Mitarbeiter verbinden dauerhafte Hochlagenbesiedlung Nordosttibets nach etwa 3600 cal BP mit einer Wirtschaftsweise, die Anpassung an Abkühlung erlaubte. d’Alpoim Guedes und Mitarbeiter weisen am östlichen Plateaurand früh genutzten Weizen und Gerste nach und untersuchen deren geringere Wärmeansprüche gegenüber Hirse. Mehr Anbau in hohen Lagen kann daher aus einem Wechsel der Kulturpflanzen entstehen. Für einen klimatischen Vergleich müssen Anbauart und Technik konstant gehalten oder ausdrücklich mitmodelliert werden. [22, 23]

Für diese Großregion ergibt sich eine abgestufte Bilanz: Dayara enthält qualitative Hinweise auf mehrere frühere warm-feuchte Phasen; Naleng liefert eine veröffentlichte quantitative Schätzung aus einem benachbarten, klar abgegrenzten Gebiet; die tibetischen historischen Zeugnisse erlauben eine regionale Verbindung zwischen Umwelt und gesellschaftlicher Entwicklung. Ein am Wuchsort datierter alter Hochlagenbaum mit enger Temperaturkalibrierung und gleichzeitigem lokalen historischen Wärmezeugnis ist im überprüften Material für den Himalaja noch nicht nachgewiesen.

Siebtes Kapitel Anden

Baumwachstum in extremer Höhe

Die Sajama-Untersuchung liefert eine konkrete ökologische Kalibrierung: baumförmige Polylepis bis 4810 m und eine zugehörige gemessene Vegetationstemperatur im Boden. Am untersuchten oberen Grenzstandort sprechen die Expositionsverteilung und physiologischen Befunde für thermische Begrenzung. Eine pauschale Berufung auf Wassermangel wäre hier keine gleich gut belegte Erklärung. Die regional wichtige Feuchte darf den tatsächlich untersuchten lokalen Mechanismus nicht ersetzen. [4]

Zugleich zeigt die Untersuchung peruanischer Polylepis-Bestände saisonale Luftgradienten von 4,3 beziehungsweise 5,5 K je Kilometer an feuchten und trockenen Hängen. Damit ist eine lokale Umrechnung grundsätzlich möglich. Sie erfordert aber eine nachgewiesene alte Höhenverschiebung. Das Rechenbeispiel von 200 m in Tabelle 2 ist bewusst kein archäologisch belegter Andenfund. Ebenso ist eine heute durch Nutzung fragmentierte Waldverteilung keine unveränderte klimatische Referenz. [5]

Marcacocha und der Ausbau der Landwirtschaft im Raum Cuzco

Die Sedimente von Marcacocha auf 3355 m bilden eine wichtige Verbindung zwischen Umwelt- und Zivilisationsgeschichte. Chepstow-Lusty und Mitarbeiter interpretieren ihre Pollen-, Makrorest- und geochemischen Daten als Erwärmung ab ungefähr 1100 n. Chr., die über die Ankunft der Spanier 1532 hinaus anhielt. Sie verknüpfen günstigere Bedingungen mit dem Ausbau höher gelegener Terrassen, Bewässerung und gezielter Agroforstwirtschaft. Eine belastbare Temperaturanomalie in Grad Celsius nennen sie dafür nicht. [25]

Diese Deutung ist für die Frage nach regionaler Wärme relevant. Sie muss aber innerhalb ihrer Datengrundlage gelesen werden. Die Ausbreitung von Alnus kann zugleich menschliche Pflanzung und Bodenverbesserung ausdrücken. Mehrere Größen aus demselben Kern teilen das Altersmodell. Eine ungefähr sechsjährige Probendichte ist keine sechsjährige Datierungsgenauigkeit. Die aus dem Kern hergeleitete Agrarausweitung kann deshalb nicht ohne Weiteres als zusätzliche unabhängige Bestätigung der aus demselben Kern abgeleiteten Erwärmung gelten. [25]

Was die kolonialzeitliche Überlieferung tatsächlich beschreibt

Pedro de Cieza de León beschreibt im 1553 veröffentlichten ersten Teil seiner Peru-Chronik das Collao als kaltes und dennoch dicht besiedeltes Hochland. Kapitel XCIX nennt Kartoffelanbau und die Versorgung mit Mais aus günstigeren Tälern. Geprüft wurde die englische Übersetzung von 1864. Der Bericht belegt landwirtschaftliche Beschränkung, Anpassung und regionalen Austausch. Er enthält keine Temperaturmessung und keinen Vergleich mit den Verhältnissen um 1100. Seine Baumlosigkeitsbeschreibung ist auch keine vollständige botanische Aufnahme aller Polylepis-Vorkommen. [26]

Die Kombination mit Marcacocha zeigt eine räumliche Grenze der Argumentation. Eine regionale Erwärmung bei Cuzco und ein kaltes Collao widersprechen einander nicht. „Wärmer als vorher“ bedeutet zudem nicht, dass frostbedingte Höhenbeschränkungen verschwinden. Um beide Quellen quantitativ zu verbinden, wären ein gemeinsamer Ort, dieselbe Nutzpflanze und eine überprüfbare Veränderung ihrer Anbaugrenze nötig. Diese Informationen liegen hier nicht vor.

Dass Hochlandlandwirtschaft auch durch Technik möglich wird, illustrieren die erhöhten Felder im Titicaca-Gebiet. Kolata und Ortloff untersuchten modellhaft und experimentell, wie Wasserkanäle und erhöhte Beete den Wärmehaushalt verändern und Frostschäden mindern. Solche Anlagen erweitern die Anbaumöglichkeiten bei gegebenem Klima. Ihre Existenz allein beweist daher keine frühere Temperaturerhöhung. [27]

Patagonische Dokumente und die Grenzen ihrer Übertragung

Für den San-Rafael-Gletscher werteten Araneda und Mitarbeiter Expeditionsberichte, Karten und spätere Aufzeichnungen aus. 1675 lag die Zunge noch innerhalb des Tals; um 1875 erreichte sie einen deutlich weiter vorgerückten Stand, 1904 war ein leichter Rückzug beschrieben. Dies ist eine eigenständig historisch datierte Folge wechselnder Gletscherstände. Die Studie interpretiert den frühen Stand als Hinweis auf gemäßigte Bedingungen. Eine Gradzahl wird daraus hier nicht abgeleitet: Der tief reichende Kalbungsgletscher reagiert auch auf Niederschlag und seine eigene Dynamik und ist keine Hochlagenbaumgrenze. [28]

Eine zweite Trennung betrifft die Ursache gesellschaftlicher Krisen. Die Orurillo-Untersuchung zu Tiwanaku behandelt vor allem Dürre. Eine publizierte Erwiderung kritisiert, dass die Altersunsicherheit eine scharfe zeitliche und kausale Zuordnung zum politischen Zusammenbruch nicht trage. Da die vollständige Debatte hier nicht nachgerechnet wurde, wird keine Seite abschließend bestätigt. Sicher ist die methodische Konsequenz: Trockenheit darf nicht als Kälte ausgegeben und die Reihenfolge zweier Ereignisse nicht genauer behauptet werden, als die Datierungen erlauben. [29, 30]

Die von Buffen und Mitarbeitern an zwei Standorten am Quelccaya-Rand untersuchten, in Wuchslage erhaltenen Oberflächenpflanzen sind Distichia muscoides, eine krautige Polsterpflanze. Die Autoren beschreiben alte Vorkommen über 5200 m, gegenüber bei ihrer Untersuchung beobachteten heutigen Vorkommen bis ungefähr 5100 m. Das ist ein wertvoller Nachweis früherer örtlicher Vegetation und Eisfreiheit. Die Pflanzen sind keine Bäume; ohne artspezifische Kalibrierung wird ihre Höhendifferenz nicht in eine Temperaturdifferenz umgerechnet. [31]

Die Anden tragen somit drei unterschiedliche, jeweils belastbare Beiträge: gemessene lokale Bedingungen für heutiges Hochlagenbaumwachstum, einen qualitativen mittelalterlichen Wärmehinweis bei Cuzco und historisch datierte Umweltbeobachtungen. Die derzeitige Zusammenstellung enthält noch kein verifiziertes Paar aus einem alten Baum oberhalb einer geeigneten modernen klimatischen Baumgrenze und einem gleichzeitigen lokalen historischen Wärmezeugnis. Diese Lücke begrenzt die quantitative Synthese; sie entwertet die vorhandenen regionalen Befunde nicht.

Achtes Kapitel Nordamerikanische Hochgebirge

Beartooth Plateau mit lokaler Temperaturrekonstruktion

Am Beartooth Plateau im Großraum Yellowstone legte ein zurückweichendes Eisfeld alte Weißstämmige Kiefern, Pinus albicaulis, auf 3091 m frei. Die untersuchten Bäume lagen ungefähr 150–180 m oberhalb der heutigen Vergleichsbestandsgrenze. Ihre Chronologie umfasst etwa 5950–5440 cal BP. Die zeitliche Einordnung der jahrweise verbundenen Ringfolge besitzt einen berichteten Fehler von etwa ±51 Jahren RMSE. Dieser ist kein 95%-Intervall; die rund 510-jährige Spanne ist die Dauer der Chronologie. [32]

Für den Abschnitt ungefähr 5900–5650 cal BP rekonstruieren die Autoren ein Mai–Oktober-Mittel um 6,2 °C mit Schwankungen von etwa 0,2 °C um diesen Mittelwert. Für das spätere Absterben diskutieren sie eine Abkühlung auf ungefähr 5,8 °C. Die jüngsten Werte ihrer Untersuchung, insbesondere 2000–2020, erreichen oder übertreffen das rekonstruierte frühere Niveau. Der hohe alte Baumstand ist damit ein positiver Wärmebeleg gegenüber kühleren Vergleichsphasen, aber kein Beweis für höhere Temperaturen als in den jüngsten Jahrzehnten. [32]

Das Supplement nennt für den Fundstandort ein geschätztes Mai–Oktober-Mittel 1900–2018 von 5,8 °C. Gegenüber dieser Referenz ergibt die einfache Subtraktion 6,2 − 5,8 = 0,4 °C. Das ist eine nominelle Differenz der angegebenen Mittelwerte, keine eigens geprüfte signifikante Anomalie. Eine ungeprüfte Höhenrechnung mit 150–180 m und einem Standardgradienten könnte deutlich mehr ergeben. Gerade diese Differenz begründet, warum eine örtliche Temperaturkalibrierung aussagekräftiger ist als die Höhe allein. [33]

Die Unsicherheit verdient eine genauere Betrachtung. In Tabelle S3 des Supplements liegt der Kreuzvalidierungsfehler der jährlichen warmen Saison bei rund 0,90 °C. Die Autoren betonen die stärkere Aussage der Ringe für langsamere, jahrzehntelange bis jahrhundertelange Veränderungen. Daher darf ±0,2 °C nicht als vollständiger Rekonstruktionsfehler gelesen werden. Umgekehrt ist der Fehler einer einzelnen jährlichen Vorhersage nicht ohne weitere Rechnung der Fehler eines mehrhundertjährigen Mittels. Die statistische Genauigkeit dieser Mittel muss gesondert bestimmt werden. [33]

White Mountains als ältere Rekonstruktion höherer Baumgrenzen

LaMarche dokumentierte in den White Mountains tote Grannenkiefern bis etwa 150 m oberhalb der damaligen Baumgrenze. Er leitete aus zwei Untersuchungsgebieten hohe Baumgrenzen bis nach etwa 2200 v. Chr. ab und diskutierte eine Fortdauer günstiger Bedingungen bis ungefähr 1500 v. Chr. Seine historische Abschätzung für die warme Jahreszeit beträgt etwa 3,5 °F, also 1,9 °C, gegenüber den vorangegangenen Jahrhunderten. Es handelt sich um eine 1973 publizierte Rekonstruktion mit einem damaligen Vergleichsmaßstab. Ihre gesamte Unsicherheitsrechnung wurde hier nicht neu überprüft. [34]

Der positive Befund höher gelegener alter Bäume bleibt erhalten. Die Gradangabe wird als publizierte Interpretation ausgewiesen und nicht nachträglich zu einer Differenz gegenüber 2026 umgedeutet. Auch darf die kalifornische Schätzung nicht mit der Beartooth-Zahl gemittelt werden: Orte, Zieljahreszeiten, Methoden und Bezugsperioden sind verschieden.

Hochlagennutzung und historische Beobachtung

High Rise Village in der Wind River Range enthält mindestens 52 Hausbefunde auf einer mittleren Höhe um 3200 m. Morgan und Mitarbeiter beurteilen besonders die Datierungen zwischen 1500 und 500 cal BP, ungefähr 450–1450 n. Chr., als tragfähig. Noch ältere Daten können durch wiederverwendetes oder lange erhaltenes Holz beeinflusst sein. Der Befund dokumentiert wiederholte hoch gelegene Aufenthalte; die Zeitspanne ist kein Nachweis ununterbrochener Besiedlung. Klima und Bevölkerungsentwicklung werden beide als mögliche Einflussgrößen diskutiert. [35]

Die archäologische Zeitspanne überschneidet sich mit mittelalterlichen Regionalbefunden anderer Kontinente. Ihr eigener Temperaturgehalt ist jedoch begrenzt. Aus den Häusern allein folgen weder eine bestimmte Wärmesumme noch ein jährlicher Aufenthalt oder ein höheres Sommermittel. Für eine engere Aussage wären saisonale Nutzung, Nahrung, örtliche Pflanzenressourcen und winterliche Versorgung zu rekonstruieren.

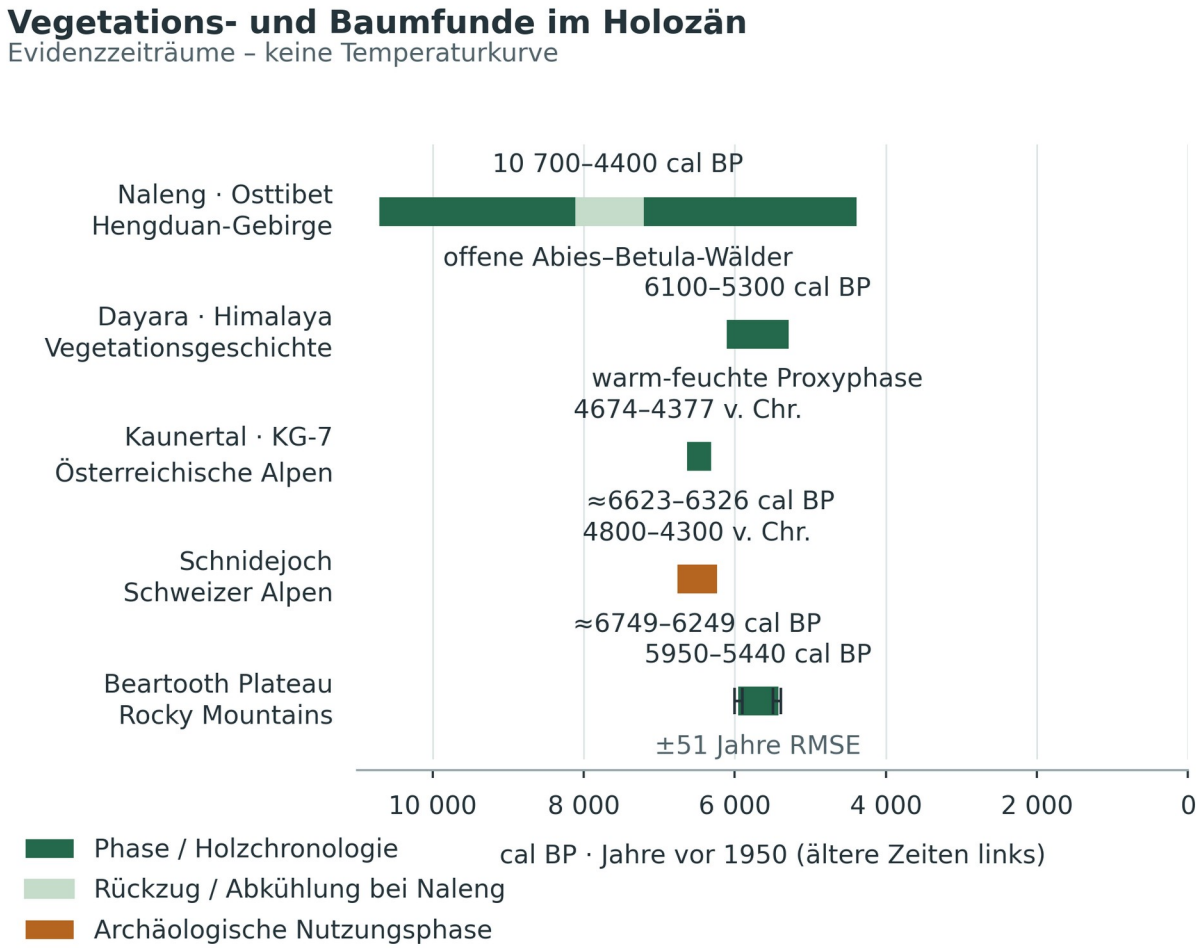
Stines Untersuchung verwurzelter Baumstümpfe in heutigen Seen und Flussbereichen der Sierra Nevada belegt lange mittelalterliche Niedrigwasserphasen. Zwei Dürreabschnitte endeten ungefähr 1112 und 1350 n. Chr. Hier enthält der Baumstandort vor allem eine hydrologische Information: Das Gelände blieb lange genug trocken, damit Bäume wachsen konnten. Die Stümpfe sind kein unmittelbarer Höhenbaumgrenzenindikator. Ihre Kombination mit anderen Temperaturarchiven kann ein warm-trockenes Regime prüfen; die Trockenheit allein liefert die Wärme nicht. [36]

Ein konkretes zeitgenössisches Schriftzeugnis ist John Muirs Artikel von 1872 über lebende Gletscher Kaliforniens. Er beschreibt seine Beobachtungen von 1871 und Messungen am McClure-Gletscher: Zwischen dem 21. August und 6. Oktober 1872 bewegte sich eine Marke um 47 Zoll in 46 Tagen. Das ist überprüfbare historische Evidenz für fließendes Eis. Eine mittelalterliche Warmphase oder eine Temperaturamplitude wird darin nicht gemessen. Der große zeitliche Abstand zu den holozänen Hochlagenbäumen bleibt bestehen. [37]

Nordamerika liefert damit besonders aussagekräftige physische Höhenbefunde und eine lokale saisonale Temperaturrekonstruktion. Die kulturgeschichtliche Ergänzung erfolgt für ältere Zeiten vor allem archäologisch, für jüngere Zeiten durch schriftliche Beobachtung. In der ausgewählten Literatur entsteht daraus noch keine lückenlose, gleichzeitig datierte Baumgrenzen- und Schriftquellenreihe über das gesamte Holozän.

Neuntes Kapitel Zeitliche Zusammenschau der Belege

Die beiden folgenden Zeitachsen trennen alte Vegetations- und Nutzungsphasen von den überwiegend jüngeren Schriftquellen. Ein langer Balken zeigt die Dauer eines Befundes oder einer interpretierten Phase. Er ist kein Fehlerbalken. cal BP bedeutet Kalenderjahre vor 1950. Die Kaunertaler Jahresangaben wurden ohne ein Jahr null umgerechnet; bei nur ungefähren Altersangaben werden Kalenderumrechnungen entsprechend gerundet.



Balkenbreite = Dauer, nicht Datierungsfehler. Naleng: 8100–7200 cal BP heller.
Beartooth: ±51 Jahre RMSE (kein 95%-Intervall); übrige Altersfehler nicht beziffert.
Schnidejoch: archäologische Nutzung, kein Baumwuchs am Pass.

Abbildung 1 Ausgewählte frühere Vegetations- und Nutzungsphasen. Die ±51 Jahre RMSE bei Beartooth betreffen die zeitliche Lage der Chronologie, nicht zwei unabhängige Fehler ihrer Endpunkte. Fehlende Unsicherheitsverteilungen werden nicht ergänzt. Die Grafik enthält verschiedene Beobachtungsarten und ist keine gemeinsame Temperaturkurve. [18, 6, 7, 17, 32]

Im älteren Zeitfenster überschneiden sich die Kaunertaler Ringfolge und die frühe Schnidejoch-Nutzung. Die Beartooth-Baumchronologie fällt dagegen später und überlappt mit der älteren warm-feuchten Dayara-Phase. Der lange Naleng-Abschnitt umfasst beide Zeitfenster, enthält jedoch selbst Veränderungen. Eine breite Phase kann deshalb nicht beweisen, dass die Maxima verschiedener Regionen genau gleichzeitig lagen. Ein gemeinsames Maximum müsste innerhalb dieser Abschnitte erst identifiziert werden.

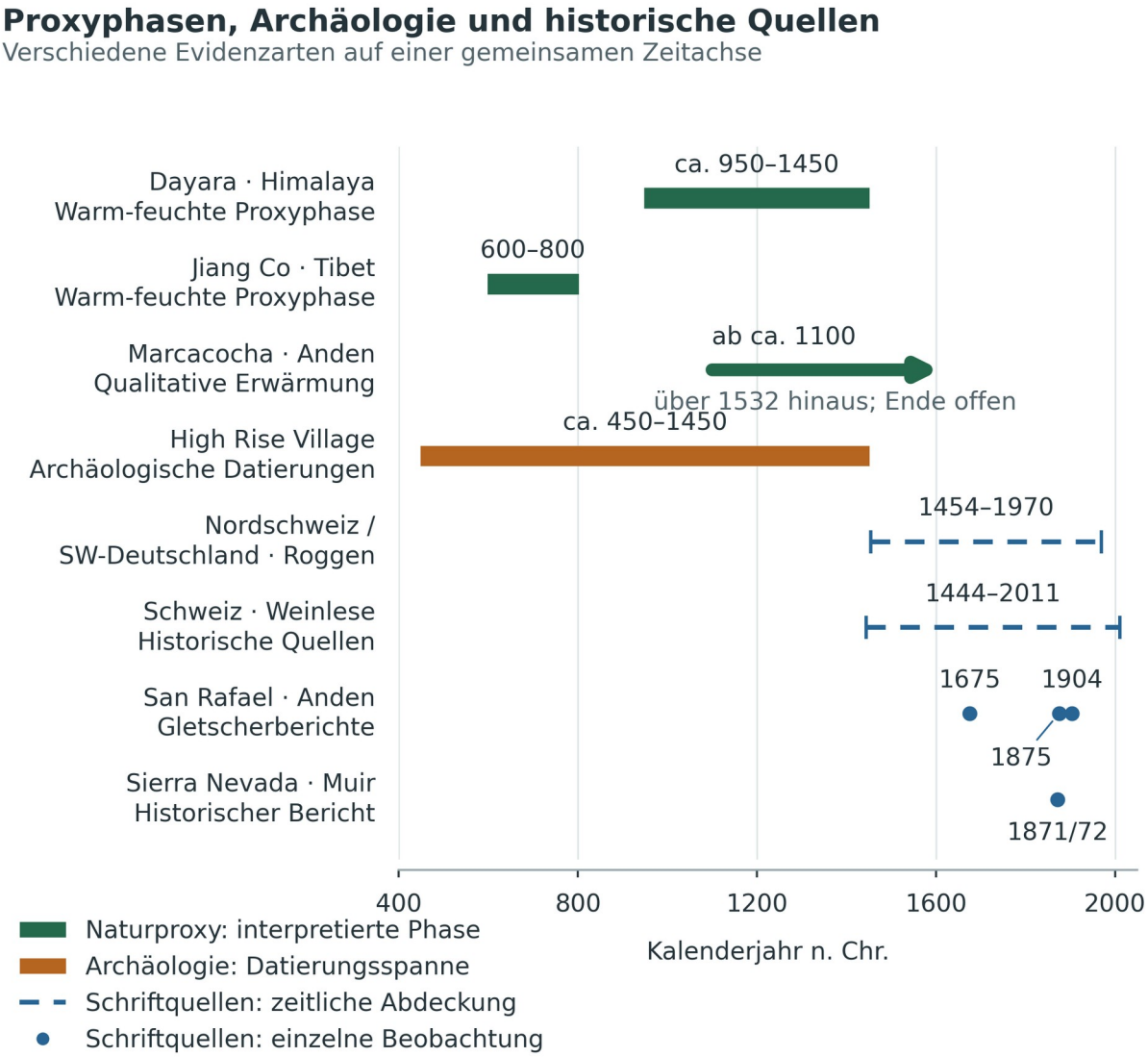


Abbildung 2 Regional interpretierte Klimaphasen, archäologische Datierungsspannen und historische Quellenabdeckung. Die Erntearchive zeigen hier ihre zeitliche Verfügbarkeit, nicht durchgehende Wärme. Der offene Marcacocha-Pfeil bezeichnet ein unbestimmtes Ende nach 1532. Für einzelne historische Beobachtungen sind Punkte eingesetzt. [17, 20, 25, 35, 10, 11, 28, 37]

Für ungefähr 1100–1450 ergibt sich eine Überschneidung zwischen der jüngeren warm-feuchten Dayara-Phase und der bei Marcacocha interpretierten Erwärmung. High Rise Village liegt mit einem Teil seiner Datierungen ebenfalls in diesem Rahmen; sein Balken liefert jedoch keine zusätzliche Temperaturamplitude. Das Jiang-Co-Intervall um 600–800 liegt deutlich früher. Bereits diese kleine Auswahl zeigt, dass die Bezeichnung einer allgemeinen „mittelalterlichen Warmzeit“ die regionalen zeitlichen Unterschiede nicht ersetzen kann.

Die Alpen ergänzen diesen Vergleich durch Waldstandorte vor den Gletschervorstößen des ausgehenden 13. Jahrhunderts sowie später durch Erntearchive. Aus der heutigen Auswahl lässt sich damit die begründete Hypothese mehrerer regionaler Wärme- und Gunstphasen entwickeln. Eine Gleichzeitigkeit auf Jahrzehntniveau ist wegen der heterogenen Datierung und zeitlichen Glättung noch nicht ausgewiesen. Auch sind die Schriftquellen in Abbildung 2 vor allem ab dem 15. Jahrhundert dicht, während mehrere ältere Naturphasen bereits beendet sind.

Tabelle 3 Verknüpfung der Quellenstränge. Die Aussagen beziehen sich auf die untersuchten Fälle, nicht auf eine vollständige Bewertung sämtlicher Archive einer Region.

Region oder Fall	Temperaturbedingung	Historische Ergänzung	Gemeinsame Aussage
Kaunertal und Schnidejoch	Bedingte sommerliche Höhenabschätzung; längeres Wachstum auf 2400 m	Zeitlich überlappende, unabhängig datierte Passnutzung	Regional günstige Bedingungen im 5. Jahrtausend v. Chr.; keine Schriftmessung
Schweiz seit dem 15. Jahrhundert	Kalibrierte Erntephänologie; Zieljahreszeit ausdrücklich bestimmt	Archivalische Ernteangaben und unabhängig erhobene Gletscherstände	Am dichtesten verknüpfte jüngere Natur- und Schriftbelege dieser Auswahl
Himalaja und Tibet	Lokale Baumgrenzenmessungen; ältere Proxyphasen mit unterschiedlicher Quantifizierung	Reichsgeschichte, retrospektive Krisenberichte und Kulturpflanzenfunde	Wärme und Feuchte können Nutzung begünstigen; Pflanzenwechsel ermöglicht Anpassung an Kälte
Anden	Moderne lokale Polylepis-Kalibrierung; qualitative Erwärmung bei Cuzco	Cieza, Agrartechnik und patagonische Expeditionsberichte	Regionale Gunstbedingungen plausibel; kein quantitatives altes Baumgrenzenpaar gesichert
Nordamerika	Alte hohe Baumstandorte; saisonale Beartooth-Rekonstruktion	Hochlagenarchäologie und Schriftzeugnisse des 19. Jahrhunderts	Starke physische Wärmebelege; ältere direkte schriftliche Temperaturbestätigung fehlt in der Auswahl

Zehntes Kapitel Temperaturgrenzen und weiterführende Folgerungen

Tabelle 4 Zahlen mit ihrer jeweiligen physikalischen Bedeutung. Absolute Bodenwerte, rekonstruierte Luftmittel und Temperaturdifferenzen sind verschiedene Größen und werden nicht gemittelt.

Ort oder Rekonstruktion	Zahl	Messgröße und Bezug	Einordnung
Kaunertal KG-7	0,93–1,09 °C	Sommerliche Höhenrechnung gegenüber dem älteren Referenzklima	Eigene bedingte Rechnung aus 155 m; kein statistisches Intervall [6]
Rolwaling	7,5 ± 0,6 °C	Boden in 10 cm Tiefe während der Vegetationszeit; Messperioden 2013–2015	Lokale Wachstumsbedingungen; keine historische Anomalie [14]
Naleng	etwa +2–3 °C	Vegetationsbasierte publizierte Schätzung; damalige Vergleichsgegenwart	Genaue Saison, Baseline und Fehler hier nicht vollständig geprüft [18]
Sajama	5,4 ± 0,1 °C	Boden in 10 cm Tiefe; 265 Tage Vegetationszeit 2003/04	Lokale Wachstumsbedingungen; keine allgemeine Mindesttemperatur [4]
Beartooth	um 6,2 °C	Rekonstruiertes Mai–Oktober-Mittel ungefähr 5900–5650 cal BP	Gegenüber dem geschätzten Mittel 1900–2018 nominell +0,4 °C; Mittelwertfehler offen [32, 33]
Schweiz 1540	+4,7 bis +6,8 °C	Bedingte April–Juli-Schätzung gegenüber 1901–2000	Narrative Phänologie; Methoden- und Saisonabhängigkeit beachten [11, 13]

Welche Aussagen die Untersuchung trägt

Frühere regionale Wärmephasen und teilweise höhere Baumgrenzen sind durch konkrete Naturarchive belegt. Die überzeugendsten Höhenbefunde enthalten Artbestimmung, Höhenlage und lange datierte Wachstumsfolgen. Für die Alpen lässt sich daraus gegenüber einem ausdrücklich älteren Referenzklima eine sommerliche Größenordnung um ein Grad begründen. Die lokale Beartooth-Rekonstruktion zeigt ebenfalls frühere günstige Wärmebedingungen und macht zugleich die Bedeutung neuerer Vergleichsperioden sichtbar.

Historische Überlieferungen erweitern diese Aussagen besonders dort, wo sie eine klimatisch empfindliche Tätigkeit zeitlich genau erfassen. Erntephänologie ist dafür besser geeignet als die bloße Existenz eines Reiches. Archäologische Hochlagennutzung besitzt eine andere Stärke: Sie belegt, dass Menschen unter bestimmten Umwelt- und Wirtschaftsbedingungen dort handeln konnten. Eine konkrete Temperaturbedingung entsteht erst, wenn die biologischen und technischen Voraussetzungen dieser Nutzung bekannt sind.

Der Wunsch nach einer überall gleichen Grenztemperatur lässt sich nicht erfüllen. Er würde Luft- und Bodenmittel, unterschiedliche Vegetationszeiten und verschiedene Baumformen gleichsetzen. Belastbarer ist ein örtlich kalibriertes Bedingungsgefüge: ausreichend lange und warme Vegetationszeit, Regeneration, geeigneter Wasserhaushalt und das Fehlen einer stärker begrenzenden Störung. Wo diese Bedingungen überprüft sind, gewinnt die Temperaturaussage an Schärfe; wo sie offen bleiben, ist eine zusätzliche Dezimalstelle kein Erkenntnisgewinn.

Wie die Verbindung beider Themen weiter geprüft werden kann

Der nächste wirksame Arbeitsschritt ist die Auswahl weniger Standorte mit besonders gutem Überschneidungsfenster. Dort sollten die alte Wuchslage, die potenzielle klimatische Vergleichsgrenze und heutige saisonale Temperaturgradienten gemeinsam erfasst werden. Die historischen Daten müssen unabhängig datiert, räumlich zugeordnet und auf dieselbe Jahreszeit bezogen werden. Ein Vergleich auf identischen Zehn- oder Fünfzigjahresabschnitten wäre aussagekräftiger als ein Nebeneinander weit gefasster Epochenbezeichnungen.

Für jeden Standort wäre anschließend zu rechnen, ob eine vorgegebene Temperaturrekonstruktion das nachgewiesene Wachstum zulässt. Liegt ihre gesamte plausible Temperaturspanne unter der lokal kalibrierten Wachstumsbedingung, entsteht ein konkreter Widerspruch. Dann sind Kalibrierung, Datierung, Standortzuordnung und die Rekonstruktion selbst zu prüfen. Diese Form des Tests kann eine zu geringe lokale Schwankungsamplitude aufdecken, ohne von vornherein festzulegen, welches Archiv fehlerhaft sein muss.

Ein warmer Standort widerlegt für sich keine globale Temperaturkurve. Eine globale Jahresmittelrekonstruktion verbindet große Flächen und alle Jahreszeiten; ein Baumgrenzenbefund betrifft zunächst eine bestimmte Höhenlage und Wachstumszeit. Für die weitergehende Frage nach unterschätzter globaler Variabilität müssten die regionalen Ergebnisse in vergleichbare Temperaturen übersetzt, mit ihren Altersverteilungen zeitlich abgeglichen und räumlich gewichtet werden. Erst danach lässt sich prüfen, ob das globale Mittel frühere Schwankungen zu schwach abbildet. Eine allgemeine Unempfindlichkeit polarer Eisbohrkerne wird durch den hier durchgeführten Vergleich nicht kalibriert.

Die Untersuchung liefert damit einen prüfbaren Ansatz: Datierte Baumstandorte setzen ökologische Bedingungen, historische Überlieferungen prüfen deren Bedeutung und zeitliche Plausibilität. Die stärksten derzeitigen Ergebnisse sind regional und saisonal. Die Frage nach einer weltweit gleichzeitigen Wärmephase mit bestimmter Temperaturamplitude bleibt als konkrete Folgeuntersuchung bestehen.

Elftes Kapitel Autorenschaft und Arbeitsstand

Die Autorenschaft lautet Dr. Klaus Retzlaff und Proto. Dr. Klaus Retzlaff formulierte die Forschungsfrage, die Verbindung von Baumwachstumsbedingungen und historischer Überlieferung sowie die Auswahl der Gebirgsregionen. Proto ist die für diese wissenschaftliche Kooperation verwendete Bezeichnung des KI-Kooperationspartners und übernahm Literaturrecherche, Quellenvergleich, Berechnungen, grafische Darstellung und Ausarbeitung dieser Fassung. Die gemeinsame Namensführung dokumentiert die vereinbarte Kooperation von Mensch und KI.

Version 01 ist ein wissenschaftlicher Arbeitsbericht vom 22. November 2026. Die Fassung enthält keine eigenen Feldmessungen und keine neue globale Temperaturrekonstruktion. Sie weist publizierte Ergebnisse, eigene bedingte Rechnungen und noch offene Hypothesen getrennt aus. Eine Prüfung der fertigen Fassung durch den menschlichen Mitautor oder eine externe wissenschaftliche Begutachtung wird mit der Autorennennung nicht vorweggenommen.

Die kritische Gegenprüfung konzentrierte sich auf konkrete Fehlerquellen: Wuchslage gegenüber Transport, Boden- gegenüber Lufttemperatur, alte gegenüber neuer Vergleichsperiode, Kalenderumrechnung, Probendichte gegenüber Altersgenauigkeit und gemeinsame Ausgangsdaten. Die Zahlen der Abbildungen sind im Text und den zugehörigen Quellen nachprüfbar. Die Literaturangaben nennen auch, wenn nur Abstracts oder bestimmte Passagen und nicht die vollständigen historischen Originaleditionen geprüft werden konnten.

Zwölftes Kapitel Literatur und geprüfter Quellenumfang

Die Nummern verweisen auf die im Text verwendeten Quellen. „Volltext“ bedeutet, dass der Artikel verfügbar war und die einschlägigen Stellen geprüft wurden; es behauptet keine erneute Auswertung aller Rohdaten. Abbildungen sind eigene Darstellungen der genannten Angaben. Letzte Quellenprüfung am 22. November 2026.

[1] Körner, C.; Paulsen, J. (2004). A world-wide study of high altitude treeline temperatures. Journal of Biogeography 31, 713–732. Geprüfter Umfang: Originalabstract im Universitätsrepositorium; Messdesign und Kennwerte geprüft. https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2003.01043.x

[2] Paulsen, J.; Körner, C. (2014). A climate-based model to predict potential treeline position around the globe. Alpine Botany 124, 1–12. Geprüfter Umfang: Verlagsabstract; Modellkriterien geprüft. https://doi.org/10.1007/s00035-014-0124-0

[3] Körner, C.; Hoch, G. (2023). Not every high-latitude or high-elevation forest edge is a treeline. Journal of Biogeography 50, 838–845. Geprüfter Umfang: Volltext; Begriffe und potenzielle gegenüber realisierter Baumgrenze. https://doi.org/10.1111/jbi.14593

[4] Hoch, G.; Körner, C. (2005). Growth, demography and carbon relations of Polylepis trees at the world’s highest treeline. Functional Ecology 19, 941–951. Geprüfter Umfang: Volltext; Standort, Messzeit, Temperatur und Wuchsform. https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2005.01040.x

[5] Kessler, M.; Toivonen, J. M.; Sylvester, S. P.; Kluge, J.; Hertel, D. (2014). Elevational patterns of Polylepis tree height (Rosaceae) in the high Andes of Peru: role of human impact and climatic conditions. Frontiers in Plant Science 5, 194. Geprüfter Umfang: Volltext; lokale Gradienten, Messdefinitionen und Nutzungseinflüsse. https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00194

[6] 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. Geprüfter Umfang: Volltext; KG-7 Tabelle 2/S. 229 und S. 230, Abb. 9 –10/S. 231; Temperaturdeutung S. 232–233. https://doi.org/10.1007/s00334-005-0013-y

[7] Hafner, A. (2012). Archaeological Discoveries on Schnidejoch and at Other Ice Sites in the European Alps. Arctic 65, Supplement 1, 189–202. Geprüfter Umfang: Volltext; Fundkontext und Datierungen S. 189–197. https://doi.org/10.14430/arctic4193

[8] 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. Geprüfter Umfang: Volltext; Standorte und Messungen 2022–2023. https://doi.org/10.1007/s10113-024-02259-8

[9] 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, 624–638. Geprüfter Umfang: Volltext; Fundkontexte, Wuchs- und Todesjahre sowie Gletschervergleich. https://doi.org/10.1177/09596836221088247

[10] Wetter, O.; Pfister, C. (2011). Spring-summer temperatures reconstructed for northern Switzerland and southwestern Germany from winter rye harvest dates, 1454–1970. Climate of the Past 7, 1307–1326. Geprüfter Umfang: Volltext; Archivalien Tabelle 1 und Vergleich mit Gletscherkurven Abbildung 11. https://doi.org/10.5194/cp-7-1307-2011

[11] Wetter, O.; Pfister, C. (2013). An underestimated record breaking event – why summer 1540 was likely warmer than 2003. Climate of the Past 9, 41–56. Geprüfter Umfang: Volltext und Supplement; Kalenderkorrektur S. 43–44, Quellenlage 1540 S. 46, Bezugsperiode S. 47, Schätzung S. 48. Alte Manuskripte nicht selbst transkribiert. https://doi.org/10.5194/cp-9-41-2013

[12] Meier, N.; Rutishauser, T.; Pfister, C.; Wanner, H.; Luterbacher, J. (2007). Grape harvest dates as a proxy for Swiss April to August temperature reconstructions back to AD 1480. Geophysical Research Letters 34, L20705. Geprüfter Umfang: Volltext; wegen später dokumentierter Kalenderkorrektur nicht als maßgebliche ältere Temperaturrekonstruktion verwendet. https://doi.org/10.1029/2007GL031381

[13] Orth, R.; Vogel, M. M.; Luterbacher, J.; Pfister, C.; Seneviratne, S. I. (2016). Did European temperatures in 1540 exceed present-day records? Environmental Research Letters 11, 114021. Geprüfter Umfang: Originalabstract und Einleitung; keine vollständige unabhängige Prüfung aller Modellannahmen. https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/11/114021

[14] Müller, M.; Schwab, N.; Schickhoff, U.; Böhner, J.; Scholten, T. (2016). Soil Temperature and Soil Moisture Patterns in a Himalayan Alpine Treeline Ecotone. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 48, 501–521. Geprüfter Umfang: Abstract und zugängliche Diskussionspassagen; keine vollständige Prüfung des statistischen ±-Maßes. https://doi.org/10.1657/AAAR0016-004

[15] Liang, E.; Dawadi, B.; Pederson, N.; Eckstein, D. (2014). Is the growth of birch at the upper timberline in the Himalayas limited by moisture or by temperature? Ecology 95, 2453–2465. Geprüfter Umfang: Verlagsabstract und Metadaten. https://doi.org/10.1890/13-1904.1

[16] Sigdel, S. R.; Wang, Y.; Camarero, J. J.; Zhu, H.; Liang, E.; Peñuelas, J. (2018). Moisture-mediated responsiveness of treeline shifts to global warming in the Himalayas. Global Change Biology 24, 5549–5559. Geprüfter Umfang: Volltext der Autorenfassung einschließlich ergänzender Informationen. https://doi.org/10.1111/gcb.14428

[17] Rawat, S.; Srivastava, P.; Phadtare, N. R.; Dimri, A. P. (2026). Climate variations over the past 6100 years in the high-altitude Central Himalaya. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 688, 113614. Geprüfter Umfang: Verlagsabstract und Highlights; erschienen am 15. April 2026. Volltext und Altersmodell nicht vollständig zugänglich. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2026.113614

[18] Kramer, A.; Herzschuh, U.; Mischke, S.; Zhang, C. (2010). Holocene treeline shifts and monsoon variability in the Hengduan Mountains (southeastern Tibetan Plateau), implications from palynological investigations. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 286, 23–41. Geprüfter Umfang: Originalabstract und institutioneller Datensatz; genaue Temperaturbezugsperiode und vollständige Unsicherheitsrechnung nicht geprüft. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.12.001

[19] Liu et al. (2021). Sedimentary ancient DNA reveals a threat of warming-induced alpine habitat loss to Tibetan Plateau plant diversity. Nature Communications 12, 2995. Geprüfter Umfang: Volltext einschließlich Methoden; Altersmodell und Abhängigkeit der Habitatmodellierung geprüft. https://doi.org/10.1038/s41467-021-22986-4

[20] Hou, J. et al. (2023). Climate change fostered rise and fall of the Tibetan Empire during 600–800 AD. Science Bulletin 68, 1187–1194. Geprüfter Umfang: Originalabstract und zugängliche Methodenpassagen; keine eigene Prüfung sämtlicher Kalibrations- und Altersfehler. https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.04.040

[21] Zou, Y.; Cheng, J.; Cresswell, M. P.; Lageard, J. G. A. (2024). Disease, climate, environment and the fortunes of Buddhism during the Tibetan Empire 618–842 CE. Erdkunde 78, 175–194. Geprüfter Umfang: Volltext; Quellenkritik S. 179 –180 und historische Zusammenstellung in Tabelle 2. Die dort benutzten alten Editionen nicht vollständig selbst geprüft. https://doi.org/10.3112/erdkunde.2024.03.02

[22] Chen, F. H. et al. (2015). Agriculture facilitated permanent human occupation of the Tibetan Plateau after 3600 B.P. Science 347, 248–250. Geprüfter Umfang: Originalabstract und zugängliche Textpassagen; keine Entscheidung über alle in späteren Kommentaren diskutierten Höhenangaben. https://doi.org/10.1126/science.1259172

[23] d'Alpoim Guedes, J. A.; Lu, H.; Hein, A. M.; Schmidt, A. H. (2015). Early evidence for the use of wheat and barley as staple crops on the margins of the Tibetan Plateau. PNAS 112, 5625–5630. Geprüfter Umfang: Vollständiges Autorenmanuskript; direkt datierte Kulturpflanzen und thermische Nischenmodelle. https://doi.org/10.1073/pnas.1423708112

[24] Singh, J.; Yadav, R. R.; Negi, P. S.; Rastogi, T. (2020). Sub-alpine trees testify late 20th century rapid retreat of Gangotri glacier, Central Himalaya. Quaternary International 565, 31–40. Geprüfter Umfang: Verlagsabstract und zugängliche Ergebnispassagen; Gletscherposition von Baumgrenzenhöhe getrennt. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.08.052

[25] Chepstow-Lusty, A. J. et al. (2009). Putting the rise of the Inca Empire within a climatic and land management context. Climate of the Past 5, 375–388. Geprüfter Umfang: Volltext; insbesondere Tabellen 1–2, Abbildung 3 und Abschnitte 5–6. https://doi.org/10.5194/cp-5-375-2009

[26] Cieza de León, P. (1553; Übersetzung 1864). The Travels of Pedro de Cieza de León, A.D. 1532–50, contained in the First Part of his Chronicle of Peru. Übersetzt von C. R. Markham. Hakluyt Society. Kapitel XCIX, Druckseiten 359–362. Geprüfter Umfang: Das genannte Kapitel wurde in der englischen Übersetzung gelesen; keine Rückübersetzung als spanischer Originalwortlaut. https://web.seducoahuila.gob.mx/biblioweb/upload/The-travels-of-Pedro-de-Cieza-de-Leon-Parte%201.pdf

[27] Kolata, A. L.; Ortloff, C. (1989). Thermal analysis of Tiwanaku raised field systems in the Lake Titicaca Basin of Bolivia. Journal of Archaeological Science 16, 233–263. Geprüfter Umfang: Verlagsabstract; Mechanismus der Frostminderung, keine ungeprüfte Gradangabe übernommen. https://doi.org/10.1016/0305-4403(89)90004-6

[28] Araneda, A. et al. (2007). Historical records of San Rafael glacier advances (North Patagonian Icefield): another clue to “Little Ice Age” timing in southern Chile? The Holocene 17, 987–998. Geprüfter Umfang: Abstract und historische Quellenverweise; nicht sämtliche zugrunde liegenden Expeditionsmanuskripte gelesen. https://doi.org/10.1177/0959683607082414

[29] Arnold, T. E. et al. (2021). Drought and the collapse of the Tiwanaku Civilization: New evidence from Lake Orurillo, Peru. Quaternary Science Reviews 251, 106693. Geprüfter Umfang: Verlags- und Autoreninstitutsabstract. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106693

[30] Marsh, E. J.; Contreras, D. A.; Bruno, M. C.; Vranich, A.; Roddick, A. P. (2021). Comment on Arnold et al. “Drought and the collapse of the Tiwanaku Civilization: New evidence from Lake Orurillo, Peru”. Quaternary Science Reviews, 107004. Geprüfter Umfang: Autorenabstract zur Altersmodellkritik; zugehörige Antwort bibliographisch geprüft: 10.1016/j.quascirev.2021.107032. Keine abschließende Nachrechnung des Disputs. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107004

[31] Buffen, A. M.; Thompson, L. G.; Mosley-Thompson, E.; Huh, K. I. (2009). Recently exposed vegetation reveals Holocene changes in the extent of the Quelccaya Ice Cap, Peru. Quaternary Research 72, 157–163. Geprüfter Umfang: Volltext; Artbestimmung, Höhe und Pflanzenalter geprüft. https://doi.org/10.1016/j.yqres.2009.02.007

[32] Pederson, G. T. et al. (2025; online 30. Dezember 2024). Dynamic treeline and cryosphere response to pronounced mid-Holocene climatic variability in the US Rocky Mountains. PNAS 122, e2412162121. Geprüfter Umfang: Volltext; Chronologie, rekonstruierte Mai–Oktober-Temperatur und Vergleichsperioden geprüft. https://doi.org/10.1073/pnas.2412162121

[33] Pederson, G. T. et al. (2025). Supporting Information zu Dynamic treeline and cryosphere response to pronounced mid-Holocene climatic variability in the US Rocky Mountains. Geprüfter Umfang: Supplement; Standortklima sowie Tabellen S2–S4. Gehört zur vorstehenden Studie und ist keine unabhängige Untersuchung. https://www.pnas.org/doi/suppl/10.1073/pnas.2412162121/suppl_file/pnas.2412162121.sapp.pdf

[34] LaMarche, V. C., Jr. (1973). Holocene climatic variations inferred from treeline fluctuations in the White Mountains, California. Quaternary Research 3, 632–660. Geprüfter Umfang: Originalabstract und Verlagsmetadaten; historische Temperaturabschätzung nicht anhand des gesamten Artikels neu berechnet. https://doi.org/10.1016/0033-5894(73)90035-5

[35] Morgan, C.; Losey, A.; Adams, R. (2012). High-Altitude Hunter-Gatherer Residential Occupations in Wyoming’s Wind River Range. North American Archaeologist 33, 35–79. Geprüfter Umfang: Originalabstract und zugängliche Autorenfassung; Datierungsschwerpunkt und Altholzproblem. https://doi.org/10.2190/NA.33.1.d

[36] Stine, S. (1994). Extreme and persistent drought in California and Patagonia during mediaeval time. Nature 369, 546–549. Geprüfter Umfang: Originalabstract sowie Scan des veröffentlichten Artikels im Berkeley-Repositorium; hydrologische Aussage der Wurzelstümpfe. https://doi.org/10.1038/369546a0

[37] Muir, J. (1872). Living Glaciers of California. The Overland Monthly 9(6), 547–549. Veröffentlicht Dezember 1872. Geprüfter Umfang: Transkription des Originalartikels gelesen; Publikationsdaten zusätzlich im Archiv der University of the Pacific geprüft. https://www.walden.org/work/jmuir-living-glaciers-of-california-the-overland-monthly-dec1872/