

„Natürliche Klimavariationen in historischen Zeiten bis 10.000 Jahre vor heute.“

Abschlussbericht Förderkennzeichen: 01SF9813

I. Einführung

1. Aufgabenstellung

Ziel des Teilprojekts ist, Klimazustände der Nacheiszeit in Mitteleuropa möglichst quantitativ zu ermitteln und Proxydaten für Klimaparameter bereitzustellen. Damit liefern unsere Arbeiten einen Beitrag zur quantitativen Paläoklimatologie der Nacheiszeit in Mitteleuropa. Mit Hilfe dieser Zeitreihen sollen insbesondere ein besseres Verständnis der raum-zeitlichen Struktur der natürlichen Klimavariabilität sowie Aufschlüsse über rasche Klimaübergänge in der Vergangenheit gewonnen werden. Die Variationsbreite natürlicher Klimavariationen wird dadurch quantifizierbar, und der als anthropogen eingestufte Beitrag zum Klimageschehen kann vor diesem Hintergrund besser beurteilt werden. Als Klimaarchive dienen Jahrringe von Bäumen mitteleuropäischer Herkunft und die Niederschläge in Deutschland, alle diese Materialien tragen eine klimaabhängige Isotopenmarkierung. Die Isotopendaten enthalten zusätzlich Hinweise auf die Herkunft des atmosphärischen Wasserdampfs in vergangenen Zeitabschnitten und damit über Änderungen der atmosphärischen Zirkulation.

Als konkretes Ziel in dem Verbundprojekt sollen die bereits vorliegenden Zeitreihen der Isotopendaten ergänzt, bezüglich ihrer Klimarelevanz bewertet, mittels Transferfunktionen in Proxydaten der Temperatur und Feuchte überführt und schließlich einer statistischen Analyse unterzogen werden.

Der Stellenwert dieser Arbeiten für das Verbundprojekt "Natürliche Klimavariationen in historischen Zeiten bis 10.000 Jahre" ergibt sich daraus, dass Proxydaten des Temperaturverlaufs in der Zeit bis 10.000 Jahre vor heute und in ausgewählten Zeitscheiben für die Klimamodellierung und die Bewertung des anthropogenen Einflusses auf das heutige und zukünftige Klima notwendige Voraussetzung sind.

2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens sind u.a.:

- die Verfügbarkeit des geeigneten Probenmaterials
- die Verfügbarkeit der geeigneten Analysetechnik
- die Korrelierbarkeit der wichtigsten Klimaparameter mit ^2H -, ^{13}C - und ^{18}O -Isotopengehalten
- die Möglichkeit, nichtklimabedingte Isotopeneffekte zu eliminieren
- die eigenen Erfahrung mit der klimarelevanten Interpretation von Isotopengehalten in Hölzern und die enge Zusammenarbeit mit anderen an paläoklimatischen Fragen interessierten und erfahrenen Wissenschaftlern.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Zum Erreichen des Forschungsziels, möglichst lückenlose Datenreihen für Klimamodellierung bereitzustellen, ist eine Ergänzung der bereits vorhandenen, umfangreichen Zeitreihen sowie eine Bewertung des gesamten Datenmaterials erforderlich.

Ergänzung von Zeitreihen

Es existieren bereits umfangreiche Zeitreihen von klimaabhängigen ^2H - und ^{13}C -Gehalten in der Zellulose des Spätholzes aus Jahrringen von Bäumen aus dem süddeutschen Raum. Die Lücken in diesen Chronologien gilt es mit Hilfe von dendrometrisch datierten Holzproben zu schließen. Die Isotopenanalyse (^2H , ^{18}O , ^{13}C) der Zellulose dieser Bäume trägt zur Regionalisierung der Klimainformation bei, die Analysen sollen zumindest in Zeitscheiben erfolgen, die innerhalb des Gesamtprojekts als wichtig angesehen werden und für eine regionale Klimamodellierung ausgewählt wurden.

Die Niederschläge an 18 Stationen Deutschlands, die zum Niederschlagsnetz der International Atomic Energy Agency (IAEA 1997) gehören, werden weiterhin, wie bereits in den letzten 25 Jahren, auf ihre ^2H - und ^{18}O -Gehalte analysiert.

Die Versuche in Klimakammern unter Variation der Temperatur- und Luftfeuchtebedingungen sowie der Bewässerung sollen fortgesetzt werden.

Bewertung der Proxydaten

Die Deutung der Isotopendaten als Proxydaten für Temperatur und Feuchteaussagen setzt die Kenntnis voraus, wie die Isotopenwerte von nicht-klimatischen Faktoren abhängen und wie sensitiv die Isotopengehalte auf Temperatur- und Luftfeuchteänderungen reagieren, d.h. mit welcher Transferfunktion die Proxydaten umzusetzen sind.

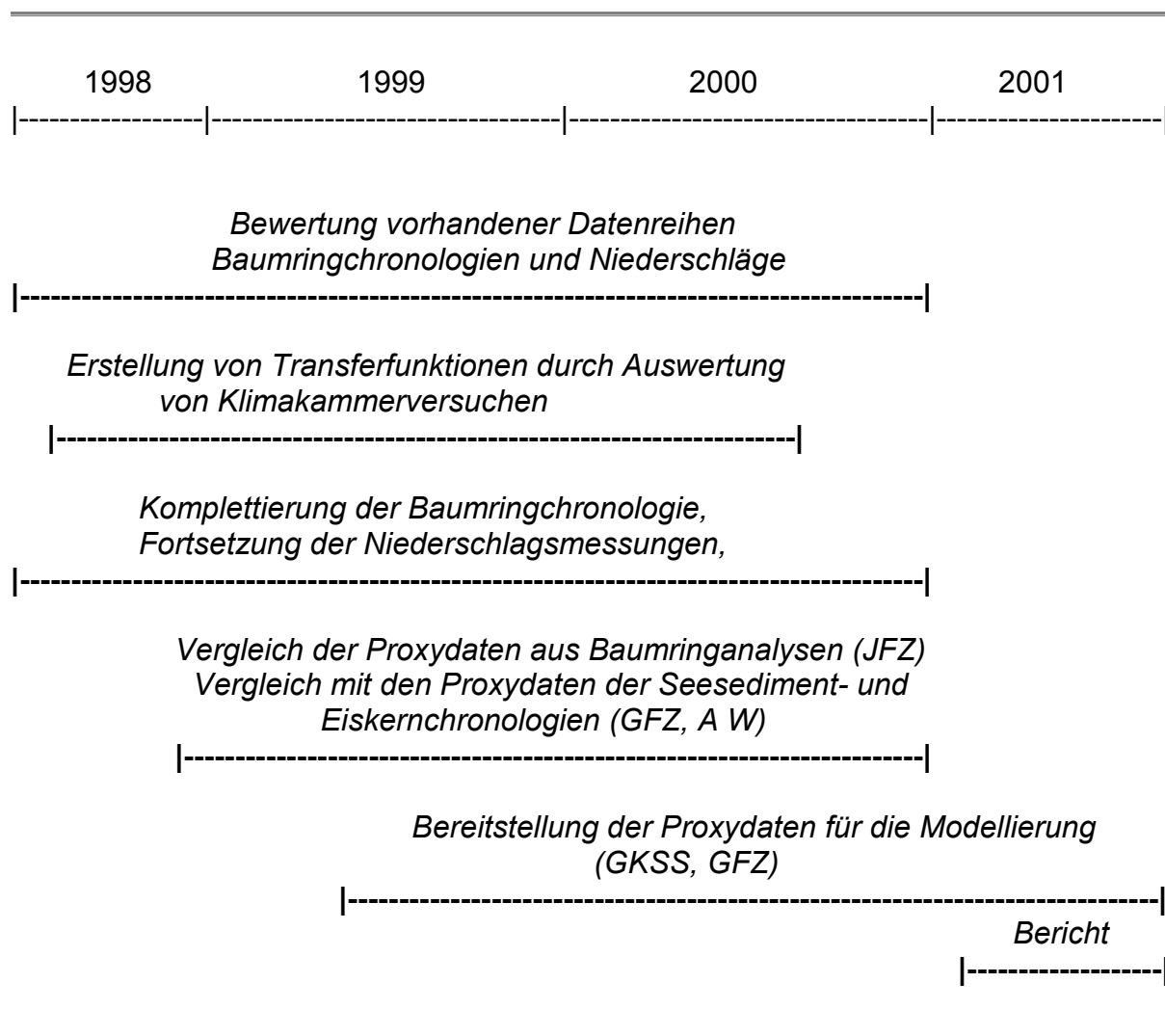
Die Transferfunktion für die Isotopendaten der Zellulose soll aus Daten bestimmt werden, die in Feldstudien im Schwarzwald und in Mittelfranken sowie in Expositionskammern erhoben wurden. Von den Untersuchungen im Schwarzwald liegen neben meteorologischen Daten detaillierte Isotopenwerte der Luftfeuchte, des Niederschlags, des Bodenwassers, des Blattwassers und der neugebildeten Nadel- und Astzellulose vor. In Mittelfranken kann das Spätholz der einzelnen Jahrringe von Fichten mit meteorologischen Parametern korreliert werden. Aus den Ergebnissen der Klimakammerversuche, in denen Temperatur, Luftfeuchte, Wasserangebot und CO_2 Partialdruck unabhängig voneinander variiert werden können, kann der Einfluss dieser Faktoren auf die Isotopengehalte der Pflanzenzellulose bestimmt werden.

Die Daten sollen einer statistischen Analyse unterzogen werden, von der unter Anwendung moderner statistischer Filtermethoden für jede Zeitreihe eine objektive Antwort auf das Signal-/Rauschverhalten und mit statistischen Frequenzanalysen Aussagen über die Periodizitäten der Klimaentwicklung erwartet werden. Die statistischen Methoden sind dem hier gestellten Problem anzupassen. Welche überregio-

nale Bedeutung (Temperatur-) Signalen zuzuschreiben ist, folgt durch Vergleich der verschiedenen Isotopen-Chronologien.

Arbeitsplan:

Der Arbeitsplan und der Einsatz der für den Antragszeitraum 07.1998 bis 06.2001 beantragten Stellen wird anhand des folgenden Schemas erläutert.



4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Verhältnisse natürlich vorkommender stabiler Isotope ($^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) in der Zellulose der Jahrringe von Bäumen sind geprägt von den Wachstumsbedingungen (insbesondere die Einflüsse von Temperatur und rel. Feuchte darauf) und können daher zur Rekonstruktion des Klimas in vergangenen Zeiten herangezogen werden.

Die Temperatur- und Feuchtebedingungen während der Wachstumsperiode des Spätholzes (Juli bis August) liegen verschlüsselt in den ^2H -Gehalten des Spätholzes vor (z.B. Epstein und Yapp 1976, Yapp und Epstein 1982). Bei der Photosynthese wird Blattwasser verwendet, das aus der Wurzelzone stammt und in den Blättern, je nach Feuchtebedingungen unterschiedlich stark der Verdunstung ausgesetzt war. Die Isotopensignatur dieses Blattwassers wird bei der Photosynthese auf die Zellulose übertragen, wobei eine (konstante) Isotopenfraktionierung auftritt, welche die ^2H -Gehalte in der Zellulose erhöht. Die ^2H -Gehalte in der Zellulose werden also von zwei klimatischen Faktoren bestimmt: Der Temperatur, die den ^2H -Gehalt im Niederschlag (Dansgaard 1964, Yurtsever und Gat 1981) und damit im Bodenwasser bestimmt, und der rel. Luftfeuchte, die für die Isotopenanreicherung im Blattwasser verantwortlich ist (Brenninkmeijer 1983). Den Einfluss dieser beiden Faktoren zu trennen, sind zusätzliche, unabhängige Informationen über einen der Parameter nötig. In gemäßigten Klimazonen sind beide Parameter weitgehend gekoppelt (Kälteperioden sind meist auch Perioden hoher Luftfeuchte und umgekehrt), so dass sich die Signale in den Zeitreihen der ^2H -Gehalte verstärken. In mediterranen Klimaten mit ausgeglichenen Temperaturen während der letzten 2000 Jahre, stehen die ^2H -Signale eher für Schwankungen der rel. Luftfeuchte (Yakir et al. 1996, Lipp et al. 1996b).

Das $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Isotopenverhältnis in pflanzlicher Zellulose scheint im wesentlichen von der Öffnung der Stomata abzuhängen und damit u.a. von der relativen Luftfeuchte (Farquhar und v. Caemmerer 1982), in gemäßigten Klimazonen damit auch von der Temperatur: je mehr sich die Pflanze durch Verengung der Stomata vor Austrocknung schützen muss, um so mehr reichert sich $^{13}\text{CO}_2$ im Interzellularraum an und wird vom Enzym Rubisco zunehmend neben dem bevorzugten $^{12}\text{CO}_2$ fixiert. Als sekundäre, nicht klimatisch bedingte Veränderungen der $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisse sind die Abnahme der ^{13}C -Gehalte des atmosphärischen CO_2 durch die zunehmende Nutzung fossiler Brennstoffe seit Mitte des vorigen Jahrhunderts (Freyer 1979, Farmer 1979, Freyer und Belacy 1983, Friedli et al. 1986, Lipp et al. 1991a) sowie die unterschiedliche Isotopendiskriminierung während verschiedener Wachstumsphasen des Baumes (Juvenileffekt) und verschiedener Baumtypen zu berücksichtigen. Bisher ungeklärt ist, wie sich unterschiedliche CO_2 Partialdrücke auf den ^{13}C -Gehalt der Pflanzenzellulose auswirken.

Mehrere Autoren haben mit Isotopendaten des Gesamtholzes von Jahrringen (Früh- und Spätholz) klimatische Entwicklungen in der Vergangenheit untersucht (Kitagawa et al. 1989, Epstein und Yapp 1976, Stuiver und Braziunas 1987, Grinsted et al. 1979, Mazany et al. 1980, Libby et al. 1976). Vom GSF-Institut für Hydrologie wurde dazu ausschließlich Spätholz verwendet und zwar das Holz von Tannen und Fichten (siehe eigene Vorarbeiten). Alle Isotopenkurven zeigen im wesentlichen übereinstimmend globale klimatische Änderungen im langzeitlichen Trend.

Eigene Vorarbeiten

Die bisherigen Arbeiten konzentrieren sich hauptsächlich auf die Untersuchung von Baumringen, auf deren Darstellung deshalb vornehmlich eingegangen wird.

Im Rahmen des Klimaprogramms des BMBF wurden am GSF-Institut für Hydrologie in Zusammenarbeit mit dem Institut für Botanik, der Universität Hohenheim Untersuchungen an rezenten und an alten Bäumen durchgeführt.

Untersuchungen an rezentem Pflanzenmaterial, die z.T. in den Klimakammern der GSF durchgeführt wurden, dienen dazu, die Abhängigkeit der Isotopengehalte in der Pflanzenzellulose und von Wachstumsbedingungen zu quantifizieren. Klimakammerversuche sind teilweise ausgewertet (Lipp et al. 1997), auch die Untersuchungen an rezenten Bäumen aus dem Schwarzwald. Mit den Studien an rezenten, ca. 100 Jahre alten Bäumen aus Mittelfranken konnte abgeleitet werden, wie sensitiv die ^2H -Gehalte der Zellulose auf Temperatur- und Feuchteschwankungen reagieren (Lipp et al. 1993a, 1993b, 1996a). Das dortige Sommerklima scheint einem etwa vierzehnjährigen Zyklus zu unterliegen, mit warm-trockenen und feuchtkühlen Sommern (Lipp et al. 1993a). Die Ursache dieser Periodizität, die in den letzten 150 Jahren auch an der Breite der Jahrringe von Bäumen aus Mitteleuropa, Colorado und New York nachweisbar ist (Schweingruber et al. 1990), ist bislang unbekannt.

Mit den Untersuchungen an alten Bäumen wurden umfangreiche Zeitreihen von ^2H - und ^{13}C -Gehalten in der Zellulose des Spätholzes aus Jahrringen von Bäumen aufgestellt, die dendrometrisch jahrgenau vom Jahrringlabor des Instituts für Botanik, der Universität Hohenheim datiert worden sind:

- Eine aus 21 Tannen des Schwarzwalds zusammengesetzten Chronologie (1004 bis 1981 A.D.). Die Isotopenreihen belegen das Klimaoptimum im Mittelalter und die sog. Kleine Eiszeit (Lipp et al. 1991a).
- Eine aus Eichen des Donau- und Maingebiets Zusammengesetzte Chronologie (1000 bis 4000 B.P.), die sich überlappend an die Tannenchronologie anschließt.
- Eine aus 34 Kiefern zusammengesetzte ca. 2000 Jahre umfassende Chronologie des Spätglazials und Frühholozäns (Beginn der Chronologie nach ^{14}C -Datierung: 11.370 B.P.). Die ^{13}C -Reihe dokumentiert die letzte Phase der jüngeren Dryas, das Ende der jüngeren Dryas (10.000 B.P.) und die folgende Warmzeit des Präboreals, die nur durch eine kurze Phase mit kälteren Temperaturen die sich auch in Sediment- und Eiskernen andeutet, unterbrochen wird. Die ^2H -Gehalte verlaufen in diesem Zeitabschnitt nach den ^2H -Werten ähnlich. Allerdings dauert der Übergang von der jüngeren Dryas zum Präboreal länger (450 Jahre anstatt der 100 bis 200 Jahre in der ^{13}C -Chronologie), setzt aber zur selben Zeit ein (Becker et al. 1991). Die Gründe sind vermutlich in der relativ langsamen Durchmischung des Ozeans, der Quelle der ^2H -Gehalte im Süßwasser, zu suchen.

Aus den unabhängig ermittelten Zeitreihen aus Baumringweiten, ^{13}C -, ^2H - und ^{14}C -Gehalten lässt sich eine präzise Zeitskala für das Ende der Eiszeit ableiten. Das Spätglazial muss nach hochpräzisen ^{14}C -Altern und Datierungen mit Hilfe der absoluten Eichenchronologie spätestens 10.970 B.P. vor heute geendet haben.

Zeitliche Änderungen der Isotopengehalte wurden hier implizit in Analogie zu rezenten Befunden als Temperatur- oder Feuchteschwankungen interpretiert. Das unterschiedliche Verhalten der ^2H - und ^{13}C -Chronologie lässt allerdings vermuten, dass die ^2H -Gehalte des Ozeans bei der Interpretation der Baumring-, wie der Eiskernchronologien, ebenso zu berücksichtigen sind (Jouzel et al. 1992), wie die Durchmischung des Ozeans, dessen Oberflächenwasser in den Quellgebieten des atmosphärischen Wasserdampfs in Übergangsperioden durch isotopisch leichtes Schmelzwasser geprägt sein könnte.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die dendrometrischen Arbeiten und die Aufbereitung des Probenmaterials erfolgte in Kooperation mit dem Jahrringlabor des Instituts für Botanik der Universität Hohenheim (Prof. Dr. Frenzel). Eine Zusammenarbeit bei der Isotopenanalyse des Probenmaterials mit der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Schleser (ICG-4, FZ Jülich) wurde begonnen, ebenso Vergleiche mit anderen Klimaarchiven (z.B. Warven, Arbeitsgruppe von Prof. Dr. J. Negendank). Jährlich aufgelöste Wasserstoff- und Kohlenstoff-Isotopen-Daten aus Baumringen für das letzte Jahrtausend wurden den Modellierern zur Verfügung gestellt.

II. Eingehende Darstellung

1. Ergebnisse

1.1 Ergebnisse aus Klimakammerexperimenten

Die Kenntnis des Einflusses einzelner Klimaparameter auf die Verhältnisse der stabilen Isotope von Pflanzen-Material ist notwendig für Klima-Rekonstruktionen mit δD und $\delta^{13}C$ -Werten aus Baum-Jahrringen. Da jedoch unter natürlichen Bedingungen die Klimaparameter immer miteinander gekoppelt sind, ist die Abhängigkeit der Fraktionierungsprozesse in der Pflanze von z.B. Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Wasserverfügbarkeit, nur unter kontrollierten Bedingungen in Glashaus- und Klimakammerexperimenten erfassbar, in denen die Klimaparameter unabhängig voneinander geregelt werden können. Im Projektzeitraum wurden Versuche in den Expositionskammern der GSF durchgeführt, bei denen Temperatur und Luftfeuchte variiert wurden, und der Einfluss dieser Faktoren auf die Isotopenverhältnisse von verschiedenen C_3 -Pflanzen (*Eucalyptus globulus*, *Vicia faba*, *Brassica oleracea*) ermittelt wurde. Als Randbedingungen wurden jeweils vier Luftfeuchten (20%, 30%, 50%, 70%) und vier Temperaturen (14°C, 18°C, 24°C, 30°C) gewählt, die zu sieben unterschiedlichen Klimamodi (+ einer Wiederholung) kombiniert wurden. Außerdem wurden Ergebnisse aus einem früheren Versuch ausgewertet, bei dem neben der Temperatur (18°C, 28°C) und Luftfeuchte (30%, 60%) als weiterer „klimatischer“ Faktor zusätzlich die Bodenfeuchtigkeit variiert wurde.

1.1.1 Einfluss von Temperatur, Luftfeuchte und Wasserverfügbarkeit auf die $\delta^{13}C$ -Werte der Versuchspflanzen

Die Auswertung beider Versuche ergab, dass die $\delta^{13}C$ -Werte aller Versuchspflanzen mit den Parametern Temperatur, Luftfeuchte und Bewässerungsstatus negativ korreliert waren. Diese Ergebnisse stimmen mit denen anderer (experimenteller) Studien überein, in denen die Klimaparameter unabhängig voneinander variiert wurden, während in Feldstudien meist positive Korrelationen zwischen Jahrring- $\delta^{13}C$ und Temperatur gefunden wurden (Schleser et al., 1999a). Unsere Ergebnisse konnten untermauert werden durch Gaswechsellmessungen, die an den Versuchspflanzen vorgenommen wurden (Abb.1). Die aus den Messungen berechneten c_i/c_a -Werte (Verhältnis der CO_2 -Konzentration in Interzellularraum und außerhalb des Blattes) haben einen direkten Einfluss auf die $\delta^{13}C$ -Werte (Francey und Farquhar, 1982) und waren negativ mit den $\delta^{13}C$ -Werten der Versuchspflanzen korreliert.

Die Spannweite der $\delta^{13}C$ -Werte der Versuchspflanze *Vicia faba* bei gleichen Temperatur- und Luftfeuchte-Variationen war bei der Versuchsgruppe mit Trockenstress größer als bei der Versuchsgruppe, die ausreichend mit Wasser versorgt wurde. Daraus kann gefolgert werden, dass die „Klima-Sensitivität“ der $\delta^{13}C$ -Werte einer Pflanze stark von deren Wasserversorgung abhängt. Die Beziehung zwischen $\delta^{13}C$ -Wert des Pflanzenmaterials und Temperatur / Luftfeuchte lässt sich durch ein multilineares Modell beschreiben und in einer „Response surface“ darstellen (Edwards et al., 2000). Die $\delta^{13}C$ -Isolinien für die zwei unterschiedlich bewässerten Versuchsgruppen unterscheiden sich zwar in ihrer Dichte (aufgrund der Abhängigkeit der „Klima-

Sensitivität“ von der Wasserversorgung), haben jedoch die gleiche Steigung (Abb.2). Ähnliche Steigungen der $\delta^{13}\text{C}$ - Isolinien im T-RH- Diagramm wie die von *Vicia faba* wurden auch für *Eucalyptus globulus* und *Brassica oleracea* berechnet, so dass hier eine allgemeine Beziehung der $\delta^{13}\text{C}$ -Werten von C_3 -Pflanzen zu den Klimaparametern Temperatur und Luftfeuchte vorliegen könnte, die im Prinzip auch auf Bäume übertragbar sein sollte.

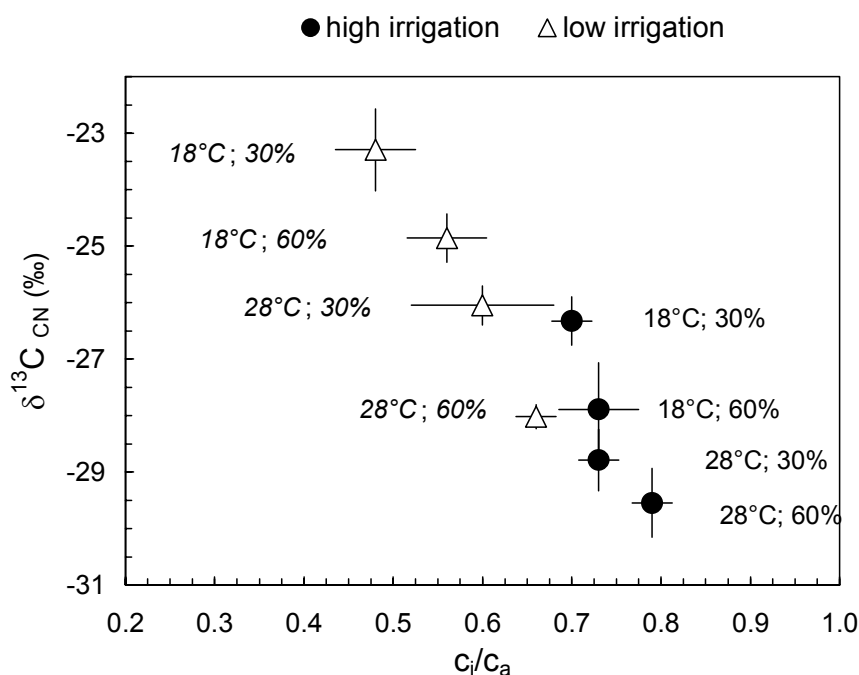


Abb.1: Vergleich zwischen den c_i/c_a -Verhältnissen (Verhältnisse der interzellularen zur ambienten CO_2 -Konzentration), die durch Gaswechsellmessungen an den Versuchs- Pflanzen (*Vicia faba*) bestimmt wurden und den zugehörigen $\delta^{13}\text{C}$ -Werten der Stängel-Zellulose bei unterschiedlichen Wachstumsbedingungen (Temperatur 18°C , bzw. 28°C , rel. Luftfeuchtigkeit 30%, bzw. 60%, Bewässerungsmodus „hoch“, bzw. „niedrig“.

1.1.2 Interpretation von $\delta^{13}\text{C}$ -Chronologien auf der Basis der experimentellen Ergebnisse

Vor dem Hintergrund der experimentellen Ergebnisse wurden die Isotopenchronologien rezenter Bäume, speziell aus Spätholz von Fichten (*Picea abies*) zweier unterschiedlicher Standorte, einem trockenen in Mittelfranken (sommerliche Niederschlagsmenge 340 mm) und einem feuchten im Schwarzwald (750 mm), neu interpretiert. Die Varianz der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Chronologien, die jeweils aus Werten von fünf Fichten bestehen, ist am Standort in Mittelfranken größer als bei den untersuchten Schwarzwald- Fichten. Aus den Ergebnissen der Klimakammerversuche lässt sich als naheliegende Ursache hierfür die unterschiedliche Wasserverfügbarkeit an den beiden Standorten ableiten. Signifikante lineare Korrelationen wurden mit den meteorologischen Daten der nächsten Stationen (Neustadt/ Aisch 1950-1981, Hornisgrinde/Schwarzwald 1953-1980) gefunden, und zwar mit Niederschlag, Tempe-

ratur und Luftfeuchte vor allem der Summe, bzw. des Mittels der Monate Juni bis August.

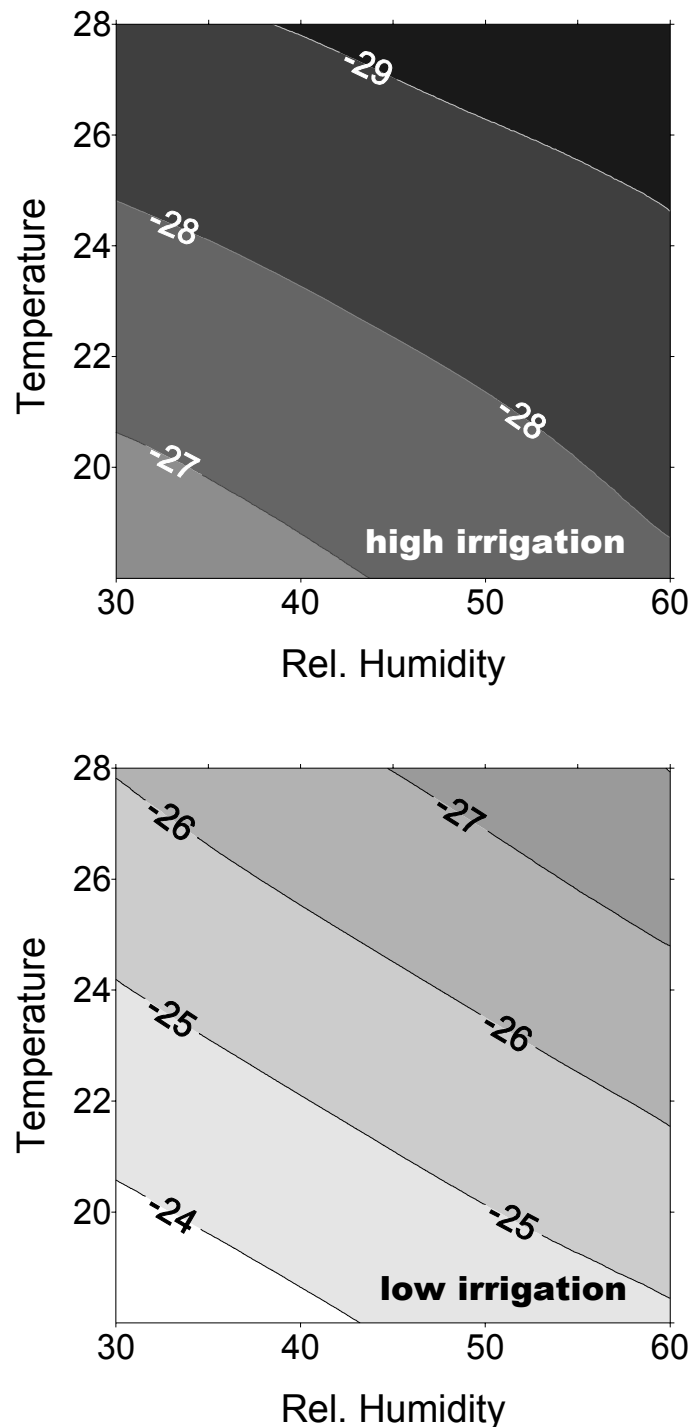


Abb.2: Isoliniendiagramme für die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von *Vicia faba* im Luftfeuchte-Temperatur-(RH-T) Raum (Daten entsprechen denen von Abb.1). Die obere Abbildung stellt die $\delta^{13}\text{C}$ -Isolinien (Linien gleicher Isotopengehalte) für die Versuchspflanzen mit hohem Bewässerungsstatus, die untere diejenige für Pflanzen mit Trockenstress dar. Multilineare Regressionen ergaben für beide Fälle eine Steigung der Isolinien von $\Delta T/\Delta \text{RH} = -0,19 \text{ } ^\circ\text{C}/\%$

Aufgrund der starken gegenseitigen Abhängigkeit der Klimaparameter wäre aus Korrelationen mit meteorologischen Daten allein eine genaue Abschätzung über den tatsächlichen Einfluss einzelner Klimaparameter auf die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Jahrringe nicht möglich. Die Auswertung der meteorologischen Daten selbst zeigte jedoch, dass an beiden Standorten zwischen sommerlichen Temperaturen und Luftfeuchten ein annähernd linearer signifikanter Zusammenhang besteht, der durch folgende Steigungen charakterisiert wird: $\Delta T/\Delta \text{RH} = -0,12^\circ\text{C}/\%$ (Neustadt/Aisch, $R^2 = 0,32$) und $\Delta T/\Delta \text{RH} = -0,16^\circ\text{C}/\%$ (Hornisgrinde, $R^2=0,65$). Vorausgesetzt, dass die $\delta^{13}\text{C}$ -Isolinien für Fichten ähnlich denen der Versuchspflanzen im T/RH Raum verlaufen, bedeutet dies, dass unter den klimatischen Verhältnissen, die an den beiden Standorten herrschen, Variationen von T und RH überwiegend parallel zu den $\delta^{13}\text{C}$ -Isolinien im Diagramm der Abb.2 verlaufen, die eine Steigung von $\Delta T/\Delta \text{RH} = -0,19^\circ\text{C}/\%$ haben. Damit hebt sich der Einfluss von T und RH auf die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte weitgehend gegenseitig auf. Daraus resultiert, dass die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Bäume beider Standorte stark vom Faktor Wasserverfügbarkeit beeinflusst werden, am trockenen Standort mehr als am feuchten. Neuere Publikationen bestätigen die starke Abhängigkeit der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von Koniferen von der Wasserverfügbarkeit (Warren et al., 2001). Korrelationen mit Gitterbox- Niederschlagsreihen aus flächengemittelten Stationsdaten von M. Hulme (CRU, Norwich) belegen, dass das hochfrequente Signal der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte vor allem am trockenen Fichten-Standort signifikant das großräumige Muster der Niederschlagsvariationen der ersten sieben Jahrzehnte des letzten Jahrhunderts widerspiegeln (Abb.3). Die Ergebnisse unserer Studie zeigen deutlich, dass die Wahl des Standortes eine bedeutende Rolle bei Paläoklima-Rekonstruktion mit $\delta^{13}\text{C}$ -Werten von Baum-Jahrringen spielt.

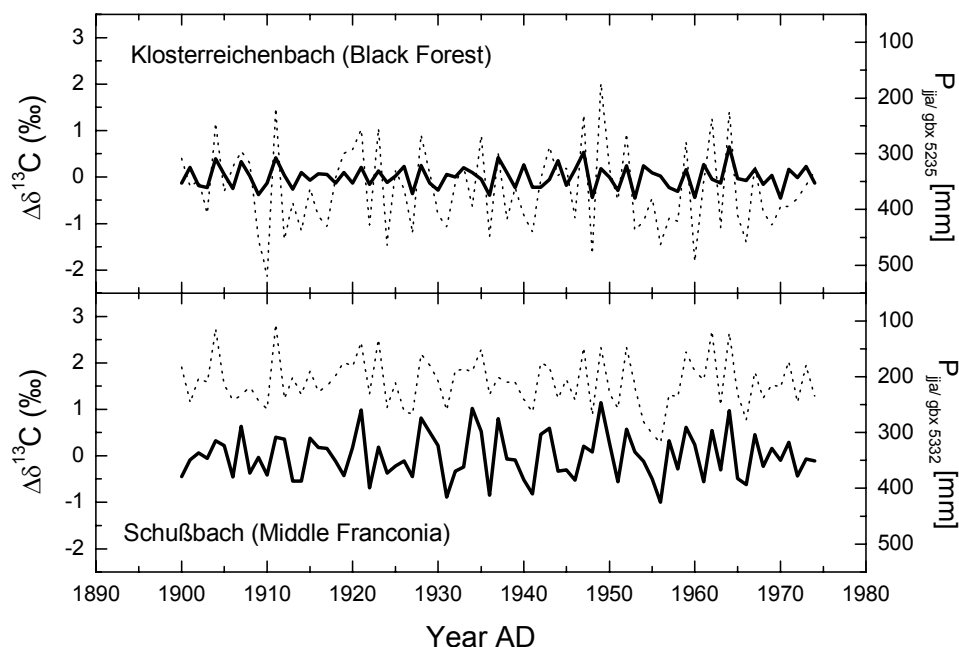


Abb.3: Hochpassgefilterte $\delta^{13}\text{C}$ -Werte (durchgehende Linien) von Fichten-Chronologien des Zeitraumes 1900-1974 von zwei Standorten in Mittelfranken, bzw. Schwarzwald im Vergleich zu flächengemittelten Niederschlagsdaten (gestrichelte Linien) der entsprechenden Gitterbox (gbx 5332, bzw. gbx 5235, M. Hulme, CRU, Norwich)

1.1.3 Faktoren, die die δD -Werte im Experiment beeinflussten

Neben den $\delta^{13}C$ -Werten wurden in den Klimakammerversuchen auch die δD -Werte des von der Pflanze aufgenommenen Wassers (Luftfeuchte und Bodenwasser) und des Pflanzenwassers (Stängel, Blätter) untersucht und mit dem δD -Wert der Pflanzenzellulose verglichen. Die δD -Werte des Stängelwassers waren identisch zu denen des Bodenwassers, eine Tatsache, die auch bei Untersuchungen des Xylem-Wassers von Bäumen festgestellt wurde (z.B. Roden et al., 2000). Dagegen war das Blattwasser durch die Transpiration der Pflanze an 2H stark angereichert. Der Grad der Anreicherung war von der Luftfeuchtigkeit abhängig, wobei die höchsten Anreicherungen bei niedrigen Luftfeuchten festgestellt wurden (Abb.4). Der Grund für diese unterschiedlich starken Anreicherungen sind v.a. höhere Netto-Transpirationsflüsse bei niedrigeren Luftfeuchten, die zu einer stärkeren Anreicherung von 2H im Blattwasser führten. Diese Ergebnisse scheinen plausibel erklärbar durch neuere Publikationen von Blattwassermodellen (Roden et al., 2000). Es konnte gezeigt werden, dass sich die durch Luftfeuchte-Variationen hervorgerufenen Unterschiede in den δD -Werten der Blätter von *Vicia faba* auch in den δD -Werten der Stängelzellulose wiederfinden. Eine Erniedrigung der Luftfeuchte von 60% auf 30% bewirkte einen durchschnittlichen Anstieg der δD -Werte in der *Vicia faba*-Zellulose von 8‰ (Abb. 5), bei δD -Ausgangswerten für Luftfeuchte (-120‰ bis -150‰) und Bodenwasser (-80‰), die auch für sommerliche, mitteleuropäische Freiland-Verhältnisse realistisch sein können.

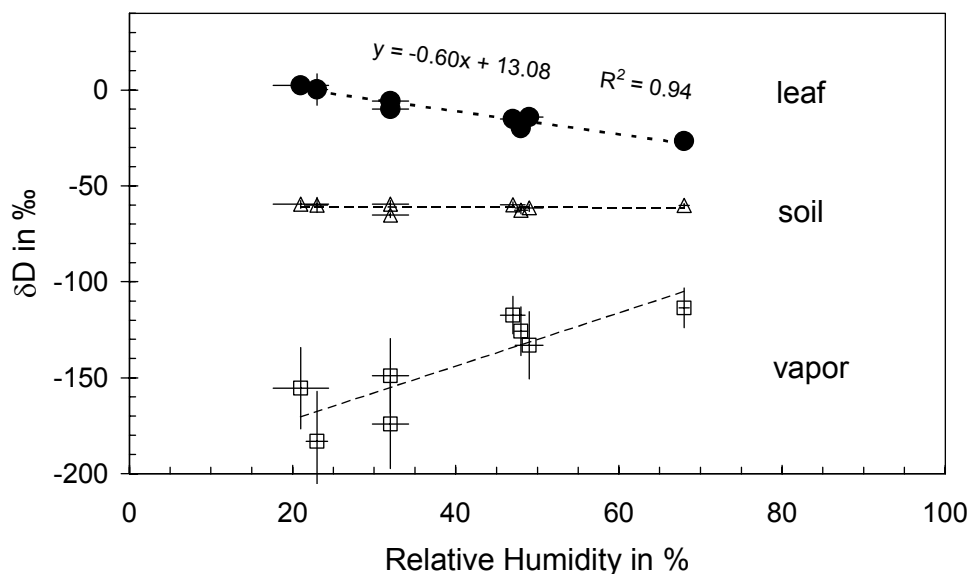


Abb.4: Unterschiede in den δD -Werten des Blattwassers von *Brassica oleracea*-Pflanzen, die unter 7 verschiedenen Klimabedingungen (+ einer Wiederholung) kultiviert wurden (jeweils Mittelwert von mindestens 4 Messungen ± 1 Stabw). Jeder Punkt repräsentiert einen Klimamodus, lediglich die Klimafaktoren Temperatur und Luftfeuchte wurden variiert. Außerdem sind die δD -Werte des Bodenwassers und der Luftfeuchtigkeit der jeweiligen Kammern dargestellt. Deutlich ist erkennbar, dass die 2H -Anreicherung des Blattwassers (Versuchspflanze: *Brassica oleracea*) von der Luftfeuchtigkeit abhängt und negativ mit dieser korreliert ist.

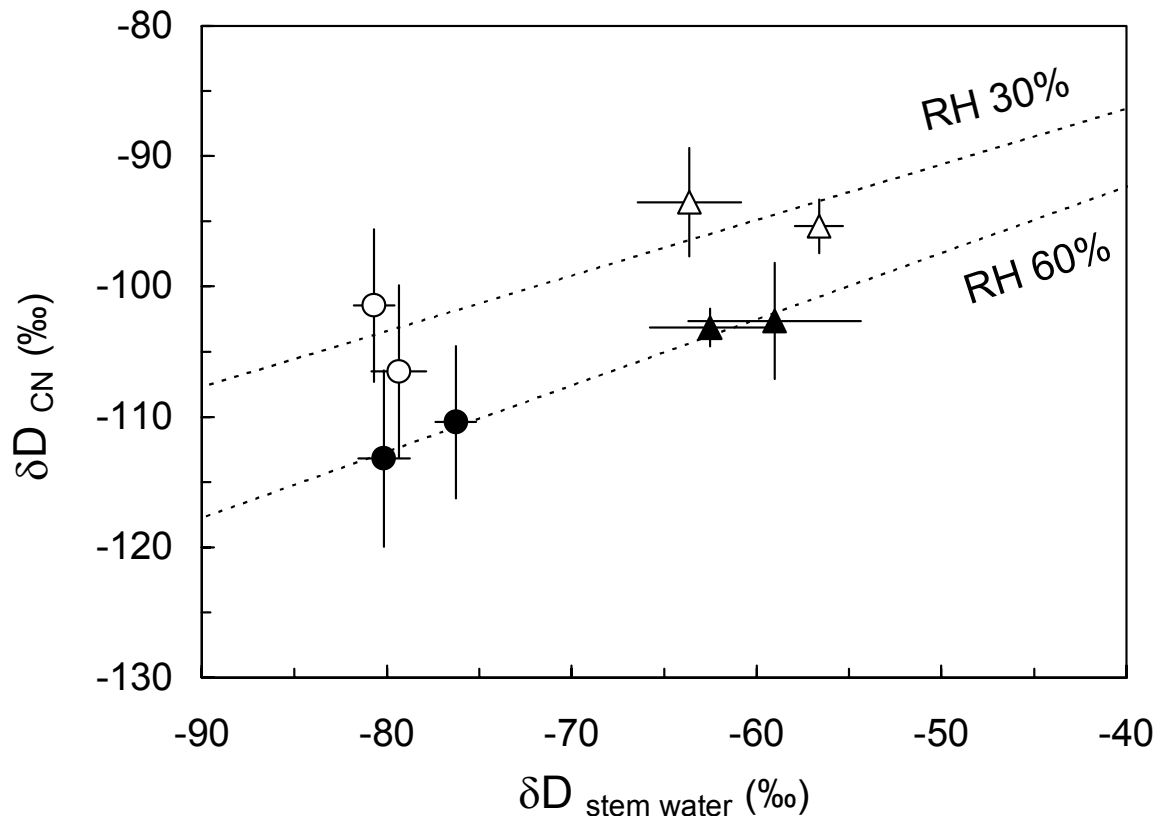


Abb.5: Abhängigkeit der δD -Werte des Zellulosenitrats (δD_{CN}) der *Vicia faba*-Pflanzen von den Luftfeuchte-Bedingungen in den Klimakammern. Sowohl gut bewässerte (runde Symbole) als auch Pflanzen unter Trockenstress (dreieckige Symbole) weisen bei der niedrigeren Luftfeuchte (30%, offene Symbole) höhere δD -Werte auf als bei der höheren (60%, gefüllte Symbole). Die Unterschiede in der Bewässerung führten außerdem wegen verschieden starker Evaporation zu Differenzen in den δD -Werten des aufgenommenen Bodenwassers, die sich in den Absolutwerten der δD_{CN} -Werte der beiden Versuchsgruppen widerspiegeln.

Berücksichtigt man die interannuellen Variationen der Luftfeuchte an den bereits erwähnten Fichtenstandorten, so wird klar, dass die Variationen der δD -Werte in den Jahrringen der Bäume (in der Größenordnung von bis 30‰) nur zu einem geringen Teil durch Luftfeuchte-Änderungen verursacht sein können, sondern vielmehr durch die Variationen der δD -Werte des aufgenommenen Wassers, d.h. des Bodenwassers und letztlich des Niederschlages. Die Klimakammerversuche zeigten jedoch, dass der Grad der ^2H -Anreicherung des Blattwasser auch vom Bewässerungsstatus abhängt. Bei ansonsten gleichen Bedingungen zeigten *Vicia faba*-Pflanzen mit Trockenstress eine geringere relative Anreicherung des Blattwasser im Verhältnis zum Bodenwasser als solche mit guter Bewässerung (Abb.6), weil sich die Pflanzen bei Trockenstress durch Schließung der Stomata vor Verdunstung schützen. Daraus wird deutlich, dass vor allem an Trockenstandorten, die Variationen der δD -Werte nicht 1:1 den Variationen des Bodenwassers entsprechen müssen.

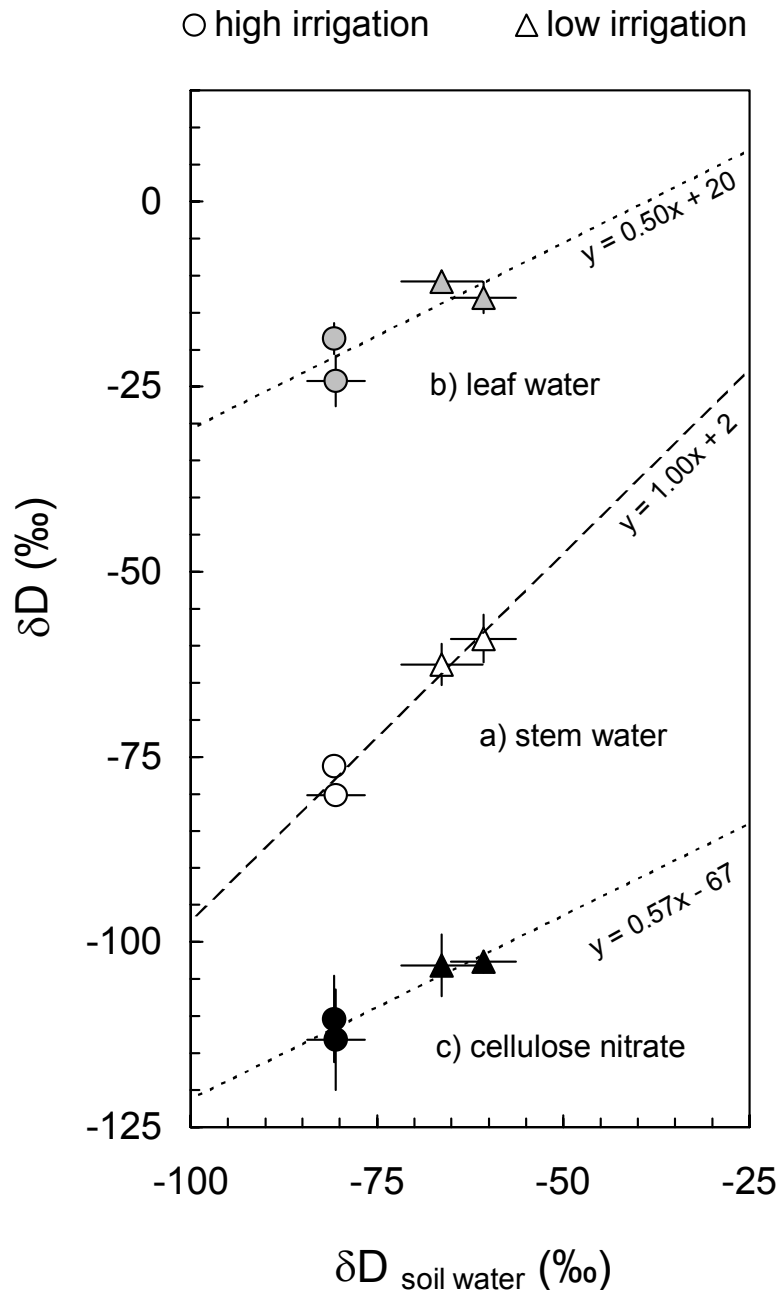


Abb.6: δD -Werte des Stängel- und Blattwassers, sowie des Zellulosenitrats von *Vicia faba*- Pflanzen im Vergleich zu den δD -Werten des Bodenwassers (X-Achse). Die Pflanzen wurden in zwei unterschiedlichen Kammern bei gleicher Luftfeuchte (60%) aber unterschiedlichen Temperaturen (18°C, 28°C) kultiviert. In jeder Kammer gab es zwei Gruppen, die unterschiedlich bewässert wurden und die in der Grafik durch unterschiedliche Symbole (Dreiecke: geringe Bewässerung, Punkte: hohe Bewässerung) unterschieden sind. Da der Effekt der Temperatur auf die δD -Werte gering war, ist die Zugehörigkeit der Werte zu der jeweiligen Kammer nicht eigens unterschieden. Das Stängelwasser (a) spiegelt die Isotopenkomposition des Bodenwassers wider (Steigung=1!). Die relative ^2H -Anreicherung des Blattwassers im Vergleich zum Stängelwasser (b) durch Transpiration ist bei den Pflanzen mit Trockenstress geringer (Steigung<1). Die Isotopenkomposition des Zellulosenitrats reflektiert die des Blattwassers (c), ist jedoch aufgrund biochemischer Fraktionierungsprozesse um ca. 90‰ zu negativeren Werten hin verschoben.

1.2. Wasserstoff- und Kohlenstoff-Isotopenverhältnisse subfossiler Eichen

1.2.1 $\delta^{13}\text{C}$ -Werte unterschiedlicher Holzkomponenten

In der Regel werden die Verhältnisse der stabilen Isotope aus Jahrringen von Bäumen an einer isolierten Holzkomponente, meist Zellulose oder Zellulosenitrat, bestimmt, da die verschiedenen Holzbestandteile (Lignin, Zellulose, Lipide, etc.) deutlich unterschiedliche Isotopenverhältnisse besitzen, und Variationen in der Holzzusammensetzung daher klimabedingte Isotopensignale überlagern können. Untersuchungen an rezenten Bäumen haben jedoch gezeigt, dass trotzdem die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von Roh-Holz ebenso gut klimatische Signale widerspiegeln können, wie die der Zellulose (Borella et al., 1998). Da die Extraktion der Zellulose und v.a. des Zellulosenitrats mit erheblichem Zeitaufwand verbunden ist, wurde im Verlauf des Projektes die Isotopenverhältnisse an unterschiedlich präparierten Holz- Proben untersucht, vor dem Hintergrund, bestehende $\delta^{13}\text{C}$ -Chronologien im gegebenen Zeitrahmen zu vervollständigen.

Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von 113 Roh-Holz-Proben wurden mit denjenigen aus dem daraus extrahierten Zellulosenitrat verglichen. Die verwendeten Jahrringe stammten von vier subfossilen Eichenstämmen. Außerdem wurden 103 weitere Holzproben aus Jahrringen von fünf subfossilen Eichen mit Toluol-Methanol in einer Soxhlet-Apparatur behandelt, um akzessorische, leicht lösliche Bestandteile (Lipide, Holzöle, etc.) zu entfernen. Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der derart vorextrahierten Proben wurden ebenfalls mit den $\delta^{13}\text{C}$ -Werten des Zellulosenitrats derselben Proben verglichen. Die Ergebnisse der Korrelationen zwischen den jeweiligen Holzkomponenten zeigt Abb. 7.

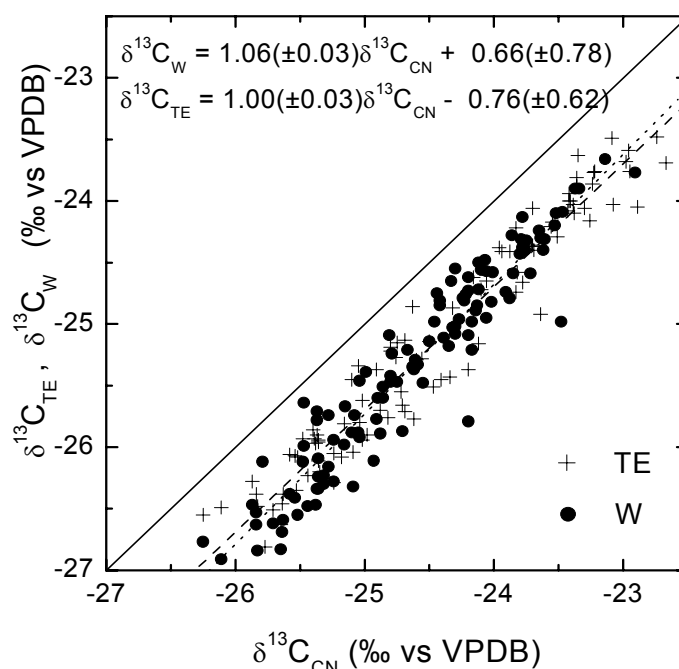


Abb.7: $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von vorextrahiertem Holz und Roh-Holz ($\delta^{13}\text{C}_{\text{TE}}$, bzw. $\delta^{13}\text{C}_{\text{W}}$) gegen die zugehörigen $\delta^{13}\text{C}$ -Werte des Zellulosenitrats ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CN}}$). Die durchgezogene Linie entspricht einem 1:1 Verhältnis.

Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte des vorextrahierten und des Roh-Holzes sind hochsignifikant mit denen des Zellulosenitrats korreliert ($P < 0,0001$, t-Test). Die absoluten $\delta^{13}\text{C}$ -Werte des Holzes sind etwa $0,7\text{‰}$ negativer als die des Zellulosenitrats, bedingt durch den Anteil an Lignin, das ein niedrigeres $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnis als Zellulose hat. Die Steigungen der Korrelationen unterscheiden sich jedoch statistisch nicht bzw. nur sehr geringfügig von 1. Aus diesen Ergebnissen kann gefolgert werden, dass die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von Roh-Holz und vorextrahiertem Holz subfossiler Eichen prinzipiell in gleichem Maße für Paläoklima-Rekonstruktionen geeignet sind wie Zellulosenitrat. Allerdings spielt der Grad der Zersetzung des Holzes, z.B. durch Verwitterung und mikrobiellen Abbau, eine Rolle, da die einzelnen Holzbestandteile während der frühen Diagenese unterschiedlich stark beeinträchtigt werden und dadurch der Gehalt des verwitterungsbeständigeren Lignins relativ zur Zellulose zunimmt. Durch zunehmenden Abbau und Verwitterung des Holzes nehmen deshalb die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte des Holzes relativ zur ursprünglichen Isotopenkomposition ab (Schleser et al., 1999b). Die Differenzen zwischen den $\delta^{13}\text{C}$ -Werten des vorextrahierten Holzes und des Zellulosenitrats der subfossilen Eichen belegen dies (Abb.8). Mit dem geologischen Alter der Eichenstämme nimmt auch deren Zersetzungsgrad zu, so dass die Differenz in den $\delta^{13}\text{C}$ -Werten zwischen dem vorextrahiertem Holz, dessen relativer Zellulosegehalt sinkt, und dem extrahierten Zellulosenitrat größer wird. Da die Unterschiede zwar signifikant ($R^2 = 0,82$; $P = 0,035$), aber relativ gering sind ($0,06\text{‰/ka}$), ist eine diesbezügliche Korrektur der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte aus vorextrahiertem Holz, bzw. Roh-Holz wohl lediglich bei Roh-Holz- Chronologien notwendig, die mehr als 1000 Jahre umfassen.

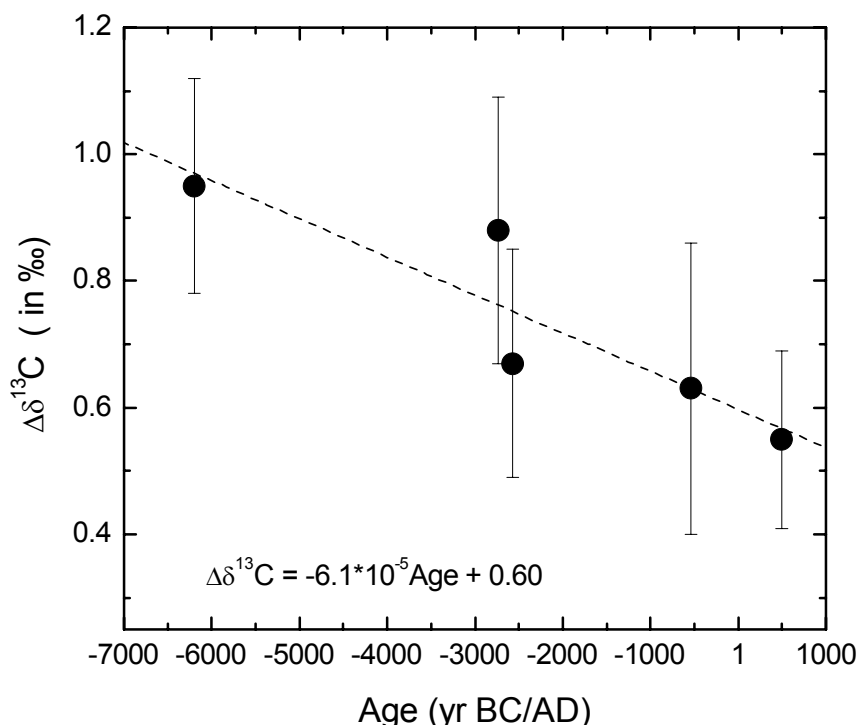


Abb.8: Differenz zwischen den $\delta^{13}\text{C}$ -Werten von vorextrahiertem Holz und Zellulosenitrat ($\Delta\delta^{13}\text{C}$, jeweils Mittelwerte von 11 bis 35 Jahrringen) von 5 subfossilen Eichen unterschiedlichen Alters.

1.2.2 δD und $\delta^{13}C$ von Frühholz und Spätholz subfossiler Eichen

Isotopenanalysen an Baum-Jahrringen werden meist am Spätholz durchgeführt, da das Frühholz stark durch mobilisierte Speicherstoffe, die vom Klima des Vorjahres beeinflusst sind, sowie von physiologischen Vorgängen geprägt ist. Das Abfräsen einzelner Spätholzjahrringe unter dem Binokular ist allerdings mit einem beträchtlichen Zeitaufwand verbunden, der die Erstellung langer Chronologien behindert. Deshalb wurden vergleichende Untersuchungen der δD - und $\delta^{13}C$ -Werte von Früh- und Spätholz an subfossilen Eichen durchgeführt, die eine Umstellung der Messungen der $\delta^{13}C$ - und δD -Werte an subfossilem Eichenholz auf 5-Jahresblöcke ermöglichten.

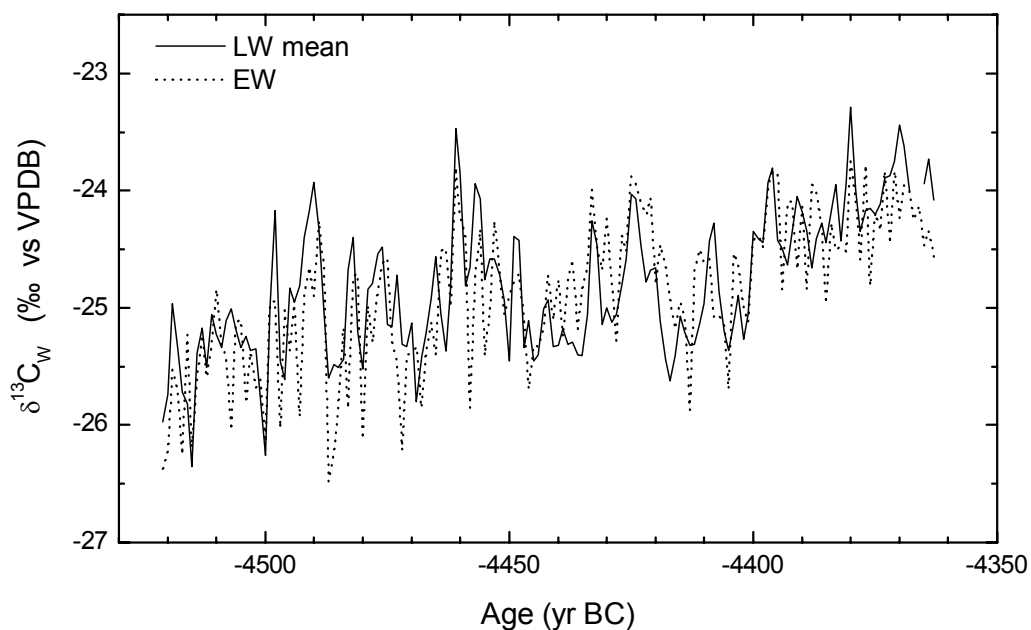


Abb.9: $\delta^{13}C$ -Werte des Frühholzes (gestrichelte Linie) und des Mittels der Spätholz- $\delta^{13}C$ -Werte des Vorjahres und des aktuellen Jahres der subfossilen Eiche Viereth 84. Außerdem wurden die δD -Werte von Frühholz und Spätholz derselben subfossilen Eiche untersucht. Verwendet wurden 5-Jahres-Sammelproben, um ausreichend Material für die Präparation von Wasserstoff zu bekommen. Vom extrahierten Zellulosenitrat wurden die δD -Werte gemessen. Die δD -Werte von Früh- und Spätholz stimmen weitgehend in den Trends überein, die Frühholz-Werte sind jedoch um durchschnittlich 17‰ positiver (Abb.10).

Im Laufe des Projektes wurden Frühholz und Spätholz von 158 aufeinanderfolgenden Jahrringen der Eiche Viereth 84 separiert, und deren $\delta^{13}C$ -Werte am Roh-Holz bestimmt. Die $\delta^{13}C$ -Werte des Frühholzes waren sowohl mit den $\delta^{13}C$ -Werten des Spätholzes des gleichen Jahres ($R^2=0,33$; $P<0,0001$) als auch mit denen des Spätholzes des vorangegangenen Jahres ($R^2=0,39$; $P<0,0001$) signifikant korreliert. Die Mittelwerte der $\delta^{13}C$ -Werte des Spätholzes des vorangegangenen Jahres und des gleichen Jahres können 52% der Variation der Frühholz- $\delta^{13}C$ -Werte erklären

(Abb.9). Ähnliche Ergebnisse wurden für rezente Eichen ermittelt (Leuenberger et al., 1998). Um abschätzen zu können, inwiefern das Frühholz-Isotopensignal bei der Verwendung von Gesamt- Jahrringen eine Rolle spielt, wurde zudem die Dichte des Früh- und Spätholzes einer subfossilen Eiche (Sand 158) bestimmt. Die durchschnittliche Dichte des Frühholzes ist mit $0,47 \text{ g/cm}^3$ wesentlich geringer als die des Spätholzes ($0,74 \text{ g/cm}^3$). Zudem sind die Frühholz- Ringbreiten bei Eichen meist deutlich geringer als die des Spätholzes. Aus den genannten Gründen sollten die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte ganzer Jahrringe zumindest für die Erfassung längerfristiger klimatischer Trends geeignet sein.

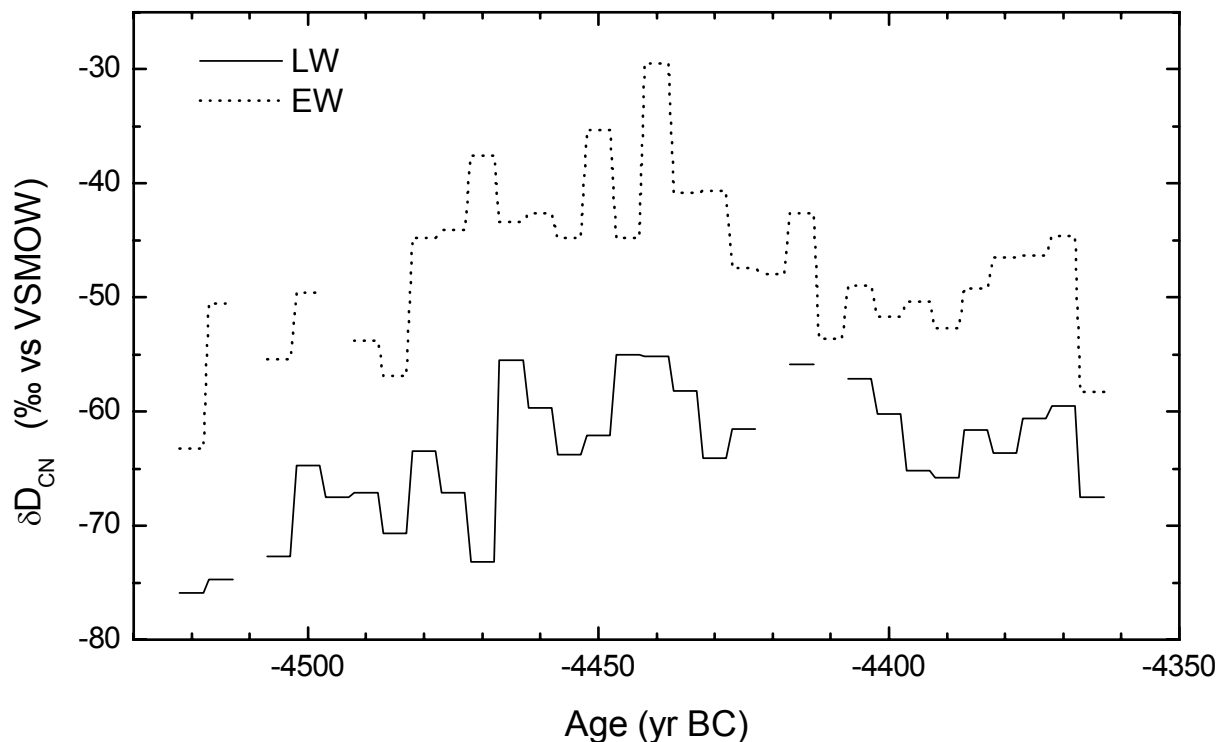


Abb.10: δD -Werte von 5-Jahres-Sammelproben von Frühholz (gestrichelte Linie) und Spätholz (durchgezogene Linie) der subfossilen Eiche Viereth 84. Das Frühholz ist stärker mit ^2H angereichert als das Spätholz.

1.2.3 Wachstumsbedingte Trends

Die δD -Sequenzen von Jahrringen werden von Wuchstrends überlagert, die keine klimatische Ursache haben, sondern wahrscheinlich von der Physiologie des Baumes bestimmt sind (Gray & Song, 1984, Lipp et al., 1992). Die vorhandene Datenbasis von δD -Werten von 48 geeigneten subfossilen Eichen erlaubte eine Berechnung eines mittleren Wuchstrends, der für die Trendbereinigung der δD -Werte aller subfossilen Eichen verwendet wurde (Abb.11). Die Korrektur des Wuchstrends der δD -Werte der subfossilen Eichen führte zu einer kontinuierlichen δD -Chronologie aus den Sequenzen der einzelnen Bäume (Abb.12).

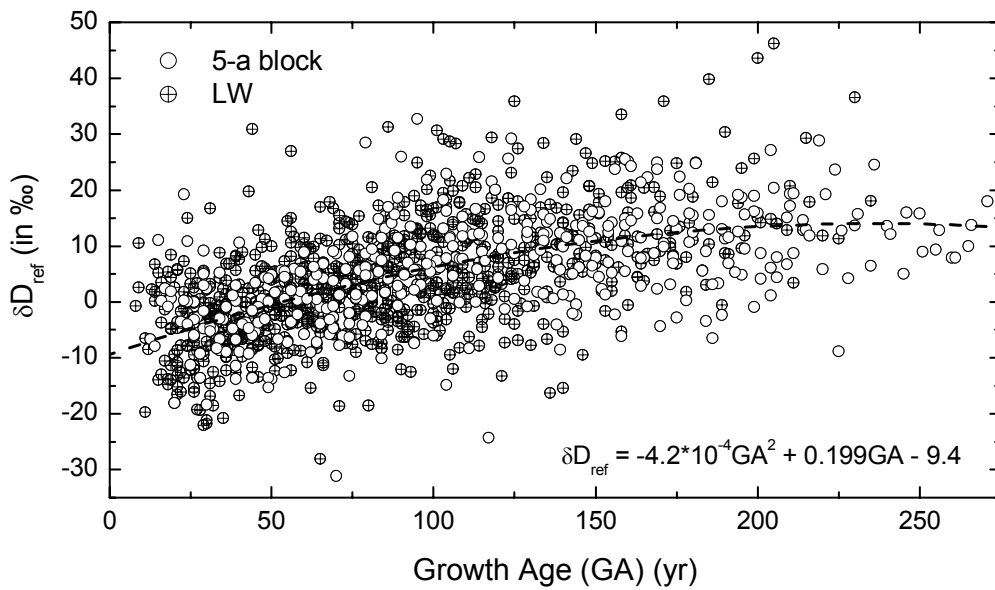


Abb. 11: Standardisierte δD -Werte von 48 subfossilen Eichen gegen das Wuchsalter. Die δD -Werte steigen bis zu einem Alter von etwa 175 Jahren an und bleiben bei Wuchsaltern $>175a$ konstant. Der Wuchstrend wird durch die angegebene Funktion beschrieben ($R^2=0,32$; $P<0,0001$; $n=1264$)

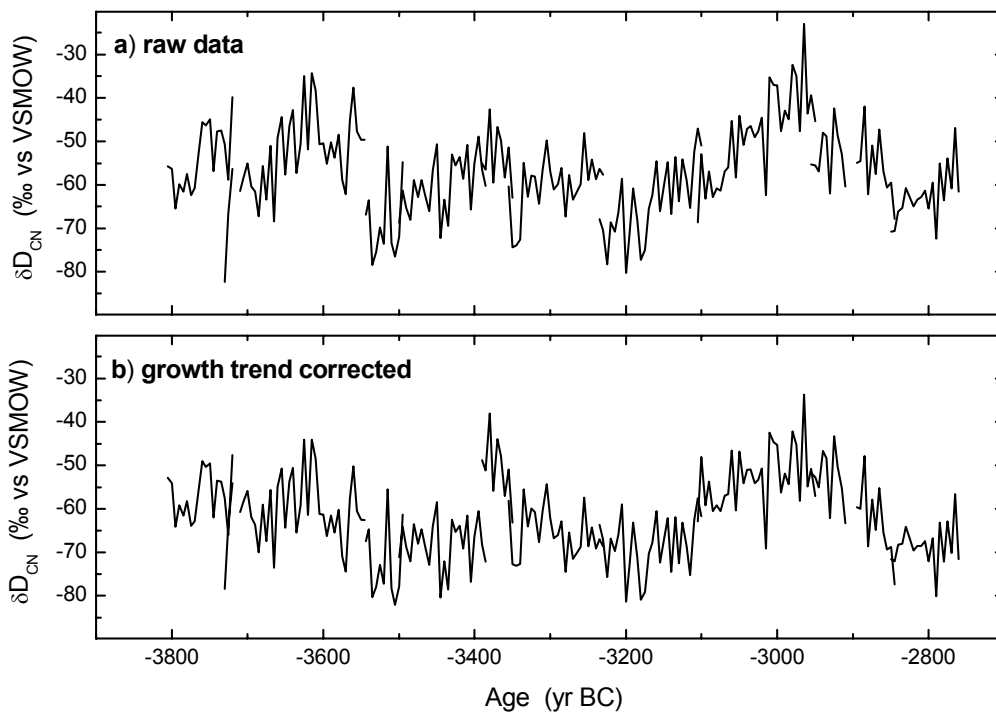
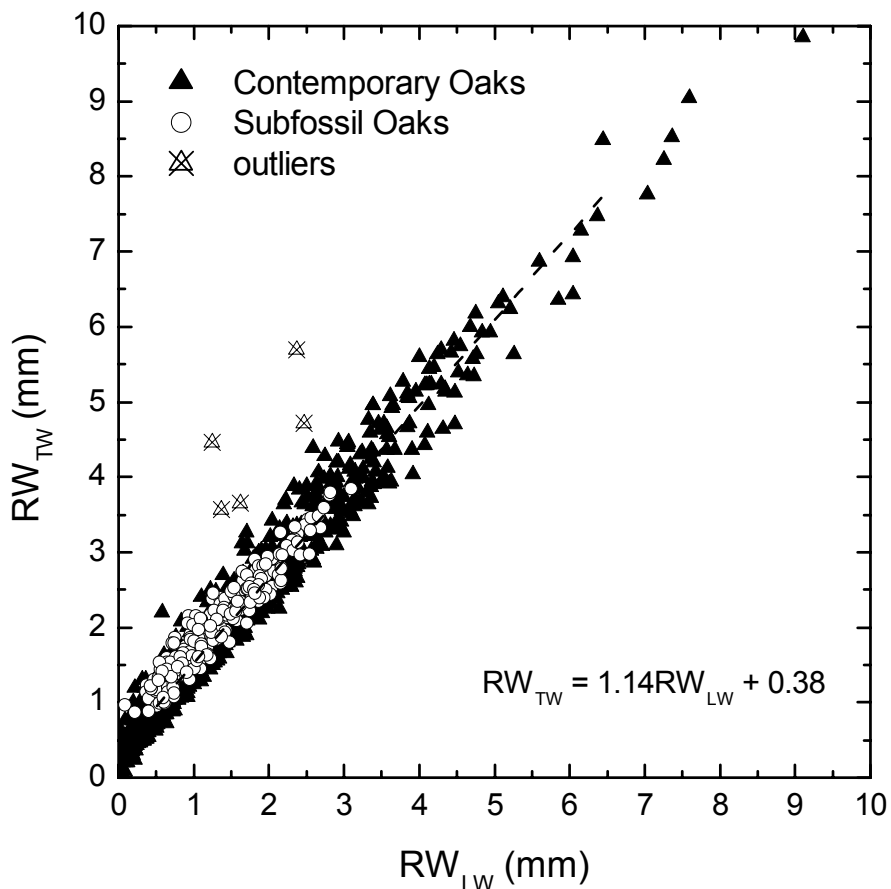


Abb.12: δD -Werte von 10 subfossilen Eichen. Die obige Abb. zeigt die unkorrigierten δD -Werte, die unteren die δD -Werte nach Korrektur des Wuchstrends. Die Korrektur des Wuchstrends führte an den Schnittstellen zu einer \pm stetigen Chronologie (b) mit



Ausnahme der Werte eines einzelnen Stammstückes, das möglicherweise aus der Baumkrone stammt und daher ein falsches Wuchsalter des Baumes liefert.

Abb.13: Jahrringbreiten gegen die entsprechenden Spätholzringbreiten von heutigen (Dreiecke) und subfossilen Eichen (Kreise). Die Korrelation von Spätholz- und Gesamtjahrringbreite ist hochsignifikant ($R^2=0,97$; $P<0,0001$), was darauf schließen lässt, dass die Jahrringbreite fast ausschließlich vom Spätholz bestimmt wird. Die Daten für heutige Eichen stammen von 20 Eichen von 3 süddeutschen Standorten (Amorbach, Schussenried, Hohenheim; $n=1902$). Die Daten der subfossilen Eichen sind von Viereth 84 und Sand 158 ($n=235$) und liegen innerhalb der Schwankungsbreite der rezenten Eichen. Die gegebene Regressionsgleichung wurde benutzt um den Spätholz-Anteil aus den Gesamtjahrringbreiten zu berechnen (fünf Ausreißer wurden nicht berücksichtigt).

1.2.4 Isotopen- Chronologien

Im Verlauf des Projektes wurden Isotopenmessungen an subfossilen Eichen weitergeführt, die an die Arbeiten vorhergehender Projekte („Isotopenklimatologie aus Jahrringen“) anknüpfen. Die Chronologien konnten auf die Zeiträume 8.230 BC bis AD 905 ($\delta^{13}\text{C}$), bzw. 6.470 BC bis AD 905 (δD) erweitert werden und liegen jeweils in fünfjährlicher Auflösung vor. Die $\delta^{13}\text{C}$ -Chronologie schließt nunmehr direkt an die

bestehenden Chronologien von Tannen aus dem Schwarzwald (AD 1.004-1.970; Lipp et al., 1991) und an die spätglazial-frühholozäne Kiefernchronologie (9.970 bis 7.959 BC, Becker et al., 1991), so dass das gesamte Holozän durch $\delta^{13}\text{C}$ -Chronologien belegt ist. Insgesamt wurden Isotopenmessungen an 82 Eichen durchgeführt. Im Hinblick auf den engen Zeitrahmen des Projektes und unter Berücksichtigung der unter 2.1 und 2.2 beschriebenen Ergebnisse wurde die ursprüngliche Beprobungsstrategie (jeder fünfte Spätholz-Jahrring) geändert und die Isotopenwerte von 5-Jahresblöcken analysiert. Ein Teil der $\delta^{13}\text{C}$ -Analysen wurde außerdem am Roh-Holz durchgeführt (8.230 bis 6.455 BC).

Um die Abschnitte der δD -Sequenzen mit unterschiedlichen Probenotypen (Spätholz oder Blöcke aus Gesamtjahrringen) zu homogenisieren, wurden Methoden entwickelt, um das δD -Signal des Spätholzes aus den Blöcken zu berechnen. Unter Berücksichtigung der mittleren Dichten von Früh- und Spätholz (siehe 2.2) und der jeweiligen Früh- und Spätholz- Ringweite wurde der Gewichtsanteil (x_{SH}) für jeden δD -Wert der Blöcke berechnet. Da die Frühholz-Ringbreite bei Eichen relativ konstant bleibt, können die Spätholz- und Frühholz- Ringbreiten aus der Gesamtringbreite abgeschätzt werden. Hierzu wurden Korrelationen mit Spätholz- und Frühholz- Ringbreiten von rezenten und subfossilen Eichen durchgeführt (Abb.13). Der δD -Wert des Spätholz-Anteiles ($\delta\text{D}_{\text{SH}}$) wurde mit einer einfachen Massenbilanz-Gleichung aus dem der Blöcke ($\delta\text{D}_{\text{GH}}$) berechnet:

$$\delta\text{D}_{\text{SH}} = \delta\text{D}_{\text{GH}} + x_{\text{SH}} \cdot \Delta\delta\text{D} - \Delta\delta\text{D}$$

Als mittlere Differenz zwischen den δD -Werten des Spät- und Frühholzes ($\Delta\delta\text{D}$) wurde der an der subfossilen Eiche Viereth 84 ermittelte Wert verwendet (siehe 2.2). Die $\delta^{13}\text{C}$ -Chronologie und die homogenisierte δD -Chronologie zeigt Abb. 14. Über große Zeiträume hinweg zeigen sich hohe Übereinstimmungen zwischen beiden Isotopenkurven, die darauf hinweisen, dass beide Isotope einen Klimamodus aufzeichnen. Diese Zeiträume sind in Abb.14c als positive r-Werte dargestellt. Unter den zahlreichen Maxima und Minima, die beiden Reihen gemeinsam sind, fällt v.a. ein Minimum zwischen 6.200 und 6.500 BC auf, das zeitgleich mit dem „8,2 ka event“ ist, das in vielen Klima-Archiven der Nordhemisphäre zu finden ist und als kühle Periode gedeutet wird.

Nach den Ergebnissen aus den Feldstudien und Klimakammern (siehe 1) können die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte als Maß für die Wasserverfügbarkeit der Pflanze interpretiert werden, während die δD -Werte die Variationen der Isotopenkomposition des von der Pflanze aufgenommenen Wassers (in der Regel also des Niederschlages) reflektieren. Da die δD -Werte des Niederschlages im wesentlichen von den Kondensationstemperaturen abhängen, geben die δD -Werte der Pflanze Auskunft über die Paläotemperatur. Zeiten, in denen hohe δD und hohe $\delta^{13}\text{C}$ -Werte beobachtet werden, könnten demnach warme, trockene Perioden widerspiegeln und niedrige δD - und $\delta^{13}\text{C}$ -Werte kalte, feuchte. Allerdings ist diese Betrachtungsweise stark vereinfachend, aufgrund der vielen zusätzlichen Faktoren, die auf die Isotopenwerte einwirken können. Vergleichende Studien an Isotopenwerten von Eichen unterschiedlicher Standorte, insbesondere an Auwald-Eichen wurden im Laufe des Projektes zwar begonnen, konnten im zeitlichen Rahmen aber leider nicht zu Ende geführt werden.

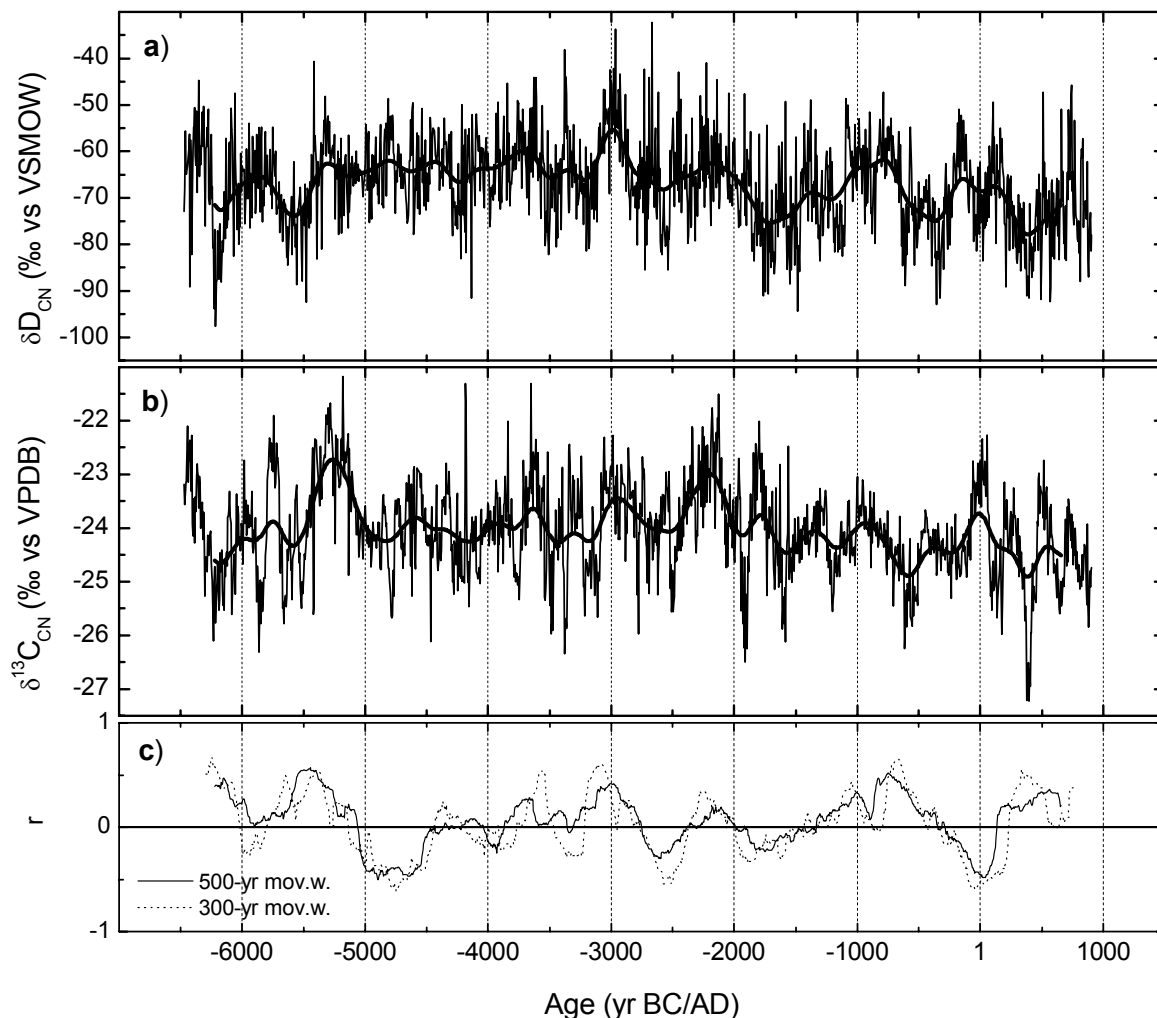


Abb.14: δD - (a) und $\delta^{13}C$ -Chronologien (b) von Messungen am Zellulosenitrat der subfossilen Eichen. Fette Linien sind tiefpassgefilterte Werte (500a). Die untere Abb. (c) zeigt die Koeffizienten gleitenden Korrelationen von 300-Jahres- und 500-Jahres-Fenstern zwischen δD und $\delta^{13}C$ -Werten

Die $\delta^{13}C$ -Sequenzen der subfossilen Eichen, die an Roh-Holz-Proben gemessen wurden, wurden an die Chronologie aus Zellulosenitrat-Werten angepasst. Zur Anpassung wurde die Regressionsgleichung aus Abb.7 verwendet. Abb.15 zeigt die um die $\delta^{13}C$ -Werte aus Rohholz verlängerte Chronologie. Die $\delta^{13}C$ -Sequenzen der einzelnen Bäume stimmen im Überlappungsbereich in der Regel gut überein, was darauf hinweist, dass die Sequenzen nicht wesentlich durch diagenetische Veränderungen beeinflusst sind. Eine Ausnahme bildet der älteste Baum der Chronologie („Bau nach 91“, siehe Pfeil in Abb.15), der erheblich leichtere Isotopenverhältnisse als die restlichen Bäume zeigt.

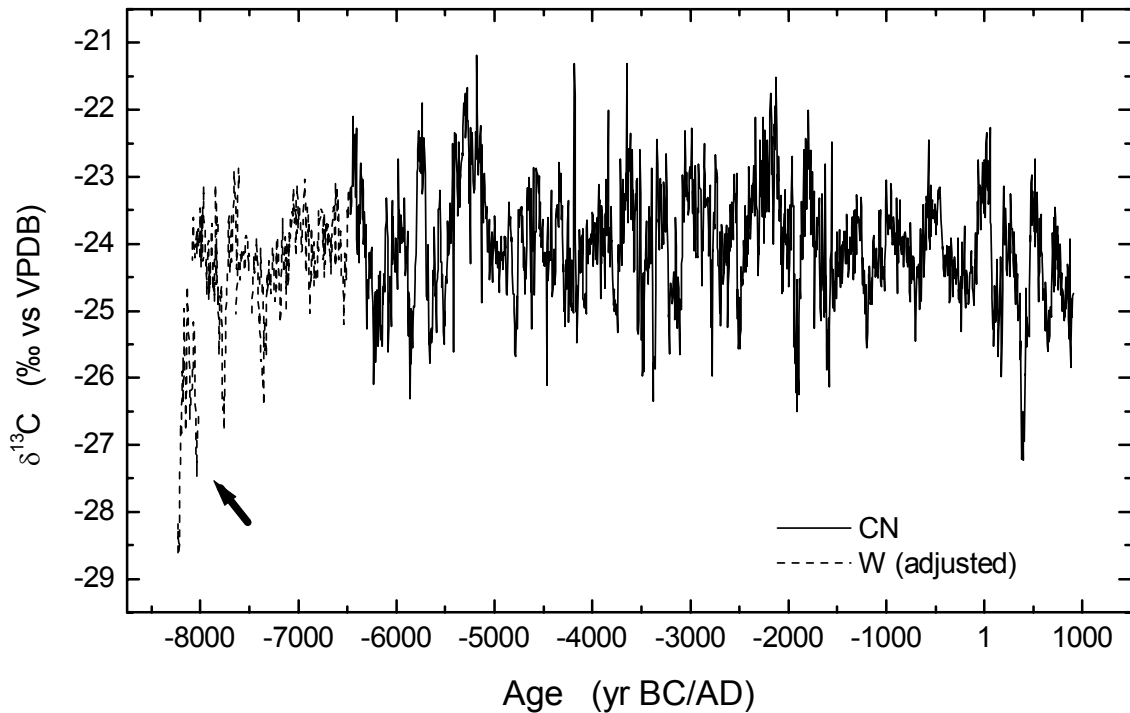


Abb.15: Kombinierte $\delta^{13}\text{C}$ -Chronologien von Zellulosenitrat-Proben (durchgezogene Linie) und Roh-Holz-Proben (gestrichelt). $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Roh-Holz-Proben wurden mit der Gleichung aus Abb.7 angepasst. Der Pfeil markiert die Werte einer einzelnen Eiche, die nicht angepasst werden konnte.

1.3. Transfer von Daten an die Modellierergruppen

Ein mittlerer Wuchstrend von δD -Werten wurde, in ähnlicher Weise wie unter 2.3 beschrieben, für süddeutsche Tannen ermittelt. Die δD -Sequenzen stammen von Tannen aus Südwestdeutschland (Lipp et al., 1991) und wurden nach erfolgter Korrektur des Wuchstrends neu zu einer Chronologie zusammengestellt, die den Zeitraum AD 1004 bis 1970 überdeckt. δD - und die zugehörige $\delta^{13}\text{C}$ -Chronologie der südwestdeutschen Tannen wurden den Modellierern des KIHZ-Projektes zur Verfügung gestellt. Die δD - und $\delta^{13}\text{C}$ -Chronologien der Tannen wurden in die Datenbank PANGAEA übernommen und werden in Zukunft auch für andere Forschungsgruppen verfügbar sein.

2. Verwertbarkeit

Der Nutzen der Arbeiten ergibt sich daraus, dass Proxy-Daten aus der Zeit des Holozäns notwendige Voraussetzung für die Klimamodellierung und die Bewertung des anthropogenen Einflusses auf das heutige und zukünftige Klima sind. Durch das Einbringen der Proxy-Daten in eine Datenbank ist gewährleistet, dass diese auch für zukünftige Klimamodellierungen zur Verfügung stehen.

3. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Für diese Region und den von uns bearbeiteten Zeitabschnitt werden unseres Wissens von anderen Gruppen keine Isotopendaten aus Baumringen erhoben.

4. Veröffentlichungen

Edwards, T.W.D., Graf, W., Trimborn, P., Stichler, W., Lipp, J., Payer, H.D: **$\delta^{13}\text{C}$ response surface resolves humidity and temperature signals in trees.** *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64 (2), 161-167 (2000).

Mayr, C., Trimborn, P., Lipp, J., Grams, T.E.E., Graf, W., Payer, H.-D. and Stichler, W.: **Climate information from stable hydrogen and carbon isotopes of C_3 plants- growth chamber experiments and field observations.** In Negendank, J.F.W., von Storch, H., Fischer, H., Kumke, T., Lohmann, G. and Floeser, G., (eds.): *The KIHZ project: Towards a Synthesis of Holocene Proxy Data and Climate Models.* Springer Verlag (eingereicht).

Mayr, C., Frenzel, B., Friedrich, M., Spurk, M., Stichler, W., Trimborn, P: **Stable carbon and hydrogen isotope ratios of subfossil oaks of southern Germany - methodological problems of a paleoclimate reconstruction.** *The Holocene* 13,3; 394-404 (2003)

Mayr, C.: **Möglichkeiten der Klimarekonstruktion im Holozän mit $\delta^{13}\text{C}$ - und $\delta^2\text{H}$ -Werten von Baum-Jahrringen auf der Basis von Klimakammerversuchen und Rezentstudien.** Dissertation LMU München, GSF-Bericht 14/02, S. 161 (2002)

5. Zitierte Literatur

(Eigene Arbeiten sind mit * markiert)

*Becker, B., Kromer, B., Trimborn, P.: **A stable-isotope tree-ring timescale of Late Glacial/Holocene boundary.** *Nature* 353, 647-649 (1991).

Borella, S., Leuenberger, M., Saurer, M., Siegwolf, R.: **Reducing uncertainties in $\delta^{13}\text{C}$ analysis of tree rings: Pooling, milling, and cellulose extraction.** *Journal of Geophysical Research* 103, 19519-19526 (1998).

Brenninkmeijer, C.A.M.: **Deuterium, oxygen-18 and carbon-13 in tree rings and peat deposits in relation to climate.** PhD Thesis, Univ. Groningen, Netherlands (1983).

Dansgaard, W. (1964). **Stable isotopes in precipitation.** *Tellus*, 16, 436-468.

*Edwards, T.W.D., Graf, W., Trimborn, P., Stichler, W., Lipp, J., Payer, H.-D: **$\delta^{13}\text{C}$ response surface resolves humidity and temperature signals in trees.** *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64 (2), 161-167 (2000).

Epstein, S., Yapp, C.J.: **Climatic implications of the D/H ratio of hydrogen in C-H groups in tree cellulose.** *Earth Planet. Sci. Lett.* 30, 255-261 (1976)

- Farmer, J.G.: **Problems in interpreting tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ records.** Nature 279, 229-231 (1979).
- Farquhar, G.D., von Caemmerer, S.: **Modelling of photosynthetic response to environmental conditions.** In Physiological plant ecology II. Water relations and carbon assimilation (Eds.: Lange, O.L., Nobel, P.S., Osmond, C.B., Ziegler, H.), Springer/Berlin Heidelberg New York, 549-587 (1982).
- Francey, R.J., Farquhar G.D.: **An explanation of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ variations in tree rings.** Nature 297, 28-31 (1982).
- Freyer, H.D.: **On the ^{13}C record in tree rings - Part I. ^{13}C Variations in northern hemispheric trees during the last 150 years.** Tellus 31, 124-137 (1979).
- Friedli, H., Löttscher, H., Oeschger, H., Siegenthaler, U., Stauffer, B.: **Ice core record of the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric CO_2 in the past two centuries.** Nature 324, 237-238 (1986).
- *Graf, W, Trimborn, P.: **Isotopengehalte der Niederschläge an Stationen aus dem süddeutschen Raum.** Beiträge zur Hydrogeologie, 48, 7-15 (1997a).
- *Graf, W, Stichler, W., Trimborn, P., Escher-Vetter, H.: **Stable isotope contents in precipitation of German meteorological stations.** Proc. of IAEA-Symposium "Isotope techniques in the study of past and current environmental changes in the hydrosphere and the atmosphere". IAEA, Wien, 14.-18. April 1997 (1997b).
- Gray, J. & Song, S.J.: **Climatic implications of the natural variations of D/H ratios in tree ring cellulose.** Earth and Planetary Science Letters 70, 129-138 (1984).
- Grinsted, M.J., Wison, A.T., Ferguson, C.W.: **$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio variations in Pinus longaeva (Bristlecone pine) cellulose during the last millennium.** Earth Planet. Sci. Let. 42, 251-253 (1979).
- IAEA (1997). Internet-Adresse: <http://www.iaea.or.at/programs/ri/gnip/gnlpmain.htm>.
- Jouzel, J., Lorius, C., Petit, J.R., Genthon, C., Barkov, N.I., Kotlyakov, V.M., Petrov, V.M.: **Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000 years).** Nature, 329, 403-408 (1987).
- Kitagawa, H., Matsumoto, E., Wada, H.: **$\delta^{13}\text{C}$ Variation of tree rings of cedars in Japan.** In: Extended abstracts of papers presented at the third int. conference on analysis and evaluation of atmospheric CO_2 , data present and past, Hinterzarten. 16-20 October 1989, WMO (ed) - Environmental pollution monitoring and research programme, No. 59, 286-291 (1989).
- Leuenberger, M., Borella, S., Stocker, T., Saurer, M., Siegwolf, R., Schweingruber, F., Matyssek, R.: **Stable isotopes in tree rings as climate and stress indicators.** Zürich: vdf. (1998).
- Libby, L.M., Pandolfi, L.J., Payton, P.H., Marshall, J., Becker, B., Giertz-Sienbenlist, V.: **Isotopic tree Thermometers.** Nature 261, 284-288 (1976).

- *Lipp, J., Trimborn, P., Fritz, P., Moser, H., Becker, B., Frenzel, B.: **Stable isotopes in tree ring cellulose and climatic change.** *Tellus* 43B, 322-330 (1991).
- *Lipp, J., Trimborn, P., Becker, B.: **Rhythmic δD fluctuations in the tree-ring latewood cellulose of spruce trees (*Picea abies* L.).** *Dendrochronologia* 10/1992, 9-22 (1993a).
- *Lipp, J., Trimborn, P., Graf, W., Becker, B.: **Climatic significance of D/H ratios in the cellulose of late wood in tree rings from spruce (*Picea abies* L.).** Proc. of IAEA-Symposium "Isotope techniques in the study of past and current environmental changes in the hydrosphere and the atmosphere". IAEA, Wien, 19.-23. April 1993, 395-391 (1993b).
- *Lipp, J., Trimborn, P., Graf, W., Edwards, T.W.D., Becker, B.: **Climate signals in a 2H and ^{13}C chronology (1882-1989) from tree rings of spruce (*Picea abies* L.), Schussbach Forest, Germany.** In: Dean, J.S., Meko, D.M., Swetnam, T.W. (Eds.) *Tree Rings, Environment and Humanity*. *Radiocarbon*, 603-610 (1996a).
- *Lipp, J., Trimborn, P., Yakir, D., Edwards, T.W.D., Waisel, Y.: **Climate signals in the carbon and oxygen isotopic composition of cellulose from *Tamarix jourdanis* L. and application to paleoclimatic reconstruction in arid regions.** *Geochim. Cosmochim. Acta* Vol. 60, No. 17, 3305-3309 (1996b)
- *Lipp, J., Trimborn, P., Payer, H.-D.: **Influence of relative humidity on the ^{13}C content in bean plants (*Vicia faba*) - A model experiment in exposure chambers.** Proc. of IAEA-Symposium "Isotope techniques in the study of past and current environmental changes in the hydrosphere and the atmosphere". IAEA, Wien, 14.-18. April 1997 (1997)
- Mazany, T., Lerman, J.C., Long, A.: **Carbon-13 in tree ring cellulose as an indicator of past climates.** *Nature* 287, 432-435 (1980).
- Roden, J.S., Lin, G., Ehleringer, J.R.: **A mechanistic model for interpretation of hydrogen and oxygen isotope ratios in tree-ring cellulose.** *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64, 21-35 (2000).
- Schweingruber, H., Aellen-Rumo, K., Weber, U., Wehrli, U.: **Rhythmic growth fluctuations in forest trees of Central Europe and the Front Range in Colorado.** *Trees* 4, 99-106 (1990).
- Schleser, G.H., Helle, G., Lücke, A., Vos, H.: **Isotope signals as climate proxies: the role of transfer functions in the study of terrestrial archives.** *Quaternary Science Reviews* 18, 927-943 (1999a).
- Schleser, G.H., Frielingsdorf, J., Blair, A.: **Carbon isotope behaviour in wood and cellulose during artificial aging.** *Chemical Geology* 158, 121-130 (1999b).
- Stuiver, M., Braziunas, T.F.: **Tree cellulose $^{13}C/^{12}C$ isotope ratios and climatic change.** *Nature* 328, 58-60 (1987).
- Warren, C.R., McGrath, J.F., Adams, M.A.: **Water availability and carbon isotope discrimination in conifers.** *Oecologia* 127, 476-486 (2001).

- *Yakir, D., Gat, J., Issar, A., Adar, E., Trumborn, P., Lipp, J.: **^{13}C and ^{18}O of wood from the Roman siege rampart in Masada (70-73 CE): Evidence for a less arid climate for the region.** *Geochim. Cosmochim. Acta* 58/16, 3535-3539 (1994).
- Yapp, C.J., Epstein, S. **Climatic significance of the hydrogen isotope ratio in tree cellulose.** *Nature* 297, 636-639 (1982).
- Yurtsever, Y., Gat, J.R.: **Atmospheric waters.** In: *Stable isotope hydrology. Deuterium and oxygen-18 in the water cycle* (ed. J.R. Gat and R. Gonflantini). International Atomic Energy Agency/Vienna. Technical reports series No. 210, 103-143 (1981).