



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH
GESELLSCHAFT MIT BESCHRÄNKTER HAFTUNG
Institut für Physikalische Chemie

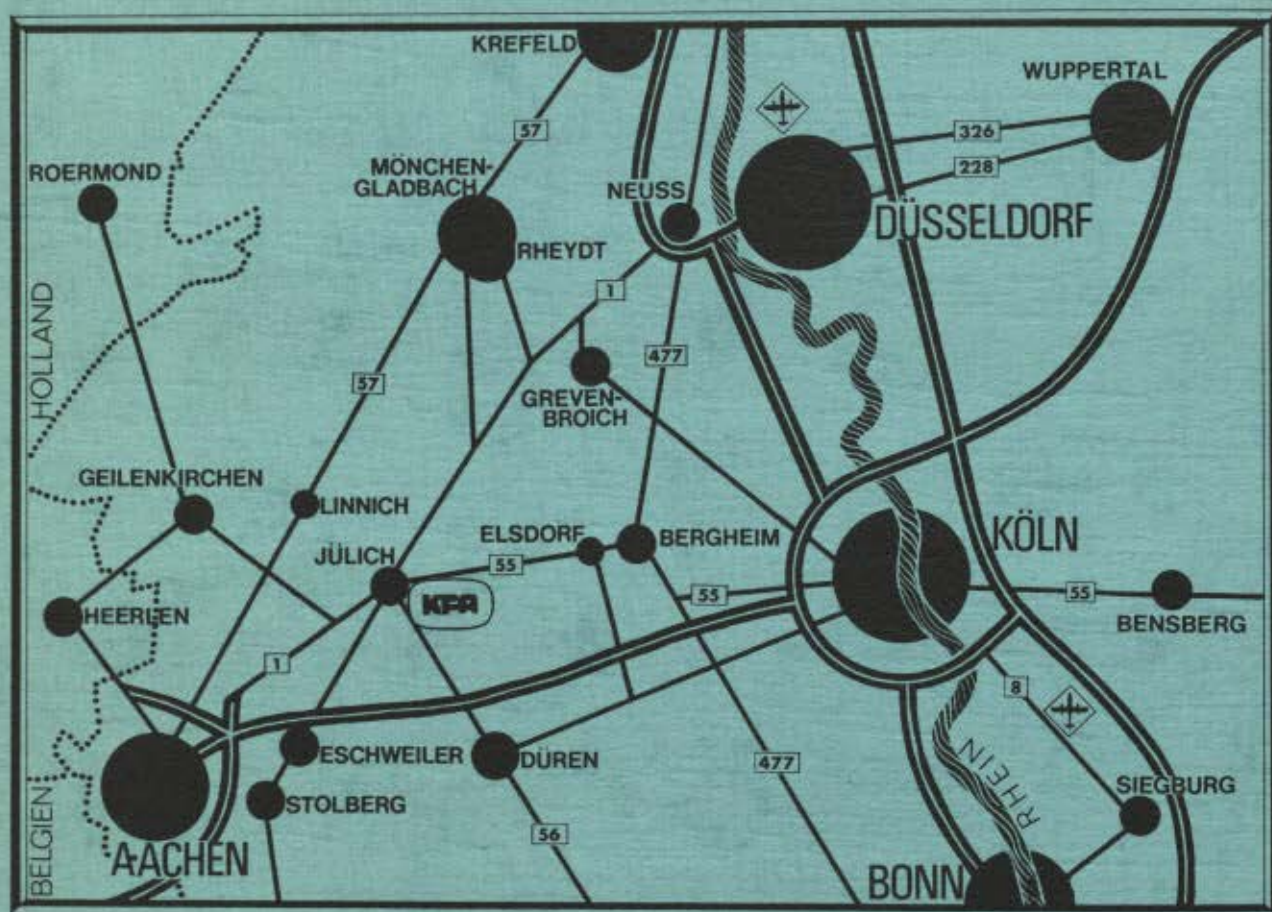
**Tagesgang der H_2^{18}O -Anreicherung
im Blattwasser von Eiche und Birke**

von

H. Förstel, H. Bernhardt und G. Schleser

Jül - 1139 - PC
November 1974

Als Manuskript gedruckt



Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 1139

Institut für Physikalische Chemie Jülich - 1139 - PC

Dok.: Stable Isotopes
 Isotope Fractionation
 Plants - Water Metabolism
 $H_2^{18}O$ Enrichment - Daily Periodicity
 Oak - $H_2^{18}O$ Enrichment
 Birch - $H_2^{18}O$ Enrichment

Im Tausch zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,
 Jülich, Bundesrepublik Deutschland

Tagesgang der H_2^{18}O -Anreicherung im Blattwasser von Eiche und Birke

von

H. Förstel, H. Bernhardt und G. Schleser

Die Arbeiten wurden im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprogramms „Sauerstoffkreislauf“ des Instituts für Physikalische Chemie der Kernforschungsanlage Jülich durchgeführt. Für technische Hilfe bei Planung und Durchführung der Versuche und bei Aufbereitung und Messung der Proben danken wir Herrn H.-J. Hützen. Wesentliche Hilfe leistete uns die Glasbläserwerkstatt des Institutes. Der Wetterstation der KFA danken wir herzlich für die Überlassung von Meßwerten.

Summary

The work presents a detailed day course of the H_2^{18}O enrichment within the leaf water of an oak and a birch. Three phases can be distinguished. After a rapid increase during the morning the H_2^{18}O content falls during the afternoon and shows a very small decrease during the time of 100 % relative humidity at night. The two species do not vary significantly.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	9
2.	Material und Methode	11
2.1	Probennahme	11
2.2	Destillation	12
2.3	Isotopenaustausch	14
2.4	Massenspektrometrie	19
2.5	Standardisierung	19
3.	Meßergebnisse	21
4.	Diskussion	27
5.	Literaturverzeichnis	39
6.	Anhang	41

1. Einleitung

In den Sauerstoffpool der Erdatmosphäre wird laufend Sauerstoff von den photosynthetisch tätigen Pflanzen abgegeben und die gleiche Menge durch die Atmung der Lebewesen wieder entzogen. Bei diesen Umsätzen im Sauerstoffkreislauf werden die drei stabilen Isotope mit den Massen 16, 17 und 18 fraktioniert. Wir betrachten nur das Verhältnis von $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ (etwa 500/1). Das Isotop ^{17}O ist zehnmal seltener als ^{18}O , und seine Fraktionierung ist zudem geringer.

Von den Fraktionierungen im geochemischen Sauerstoffkreislauf hat der Schritt der Photosynthese uns besonders interessiert. NASAROW und KUTJURIN (1971) bestätigten ältere Befunde, wonach der photosynthetisch erzeugte Sauerstoff die Isotopenzusammensetzung des Sauerstoffs im Kulturwasser hat. Dies ist allerdings bislang nur an Wasserpflanzen untersucht worden. Landpflanzen zeigen aber demgegenüber einen besonderen Effekt, der aus der Physiologie der Kohlendioxid-Aufnahme verständlich wird.

Das Kohlendioxid, das zum Aufbau der organischen Substanz in großen Mengen assimiliert wird, ist in der Luft zu 0,03 % enthalten. Die Aufnahme in die wässrige Lösung der Blattgewebe hängt außer von der Konvektion der Luft und der Zirkulation des Zellwassers besonders von der Größe der aufnehmenden Oberfläche ab. Dazu ist die Pflanze noch bestrebt, möglichst viel Lichtenergie zu absorbieren. So haben die Pflanzen ihre Blätter als großflächige Assimilationsorgane ausgebildet.

Dabei sind sie aber mit der Verdunstung des Wassers aus den Blättern in Konflikte gekommen. Eine große Fläche hat einen hohen Wasserverlust zur Folge. Deshalb hat die Pflanze einmal ein effektives Wasserleitungssystem entwickelt: Es wird durch den Unterschied des Wasserdampfdruckes an der Zelloberfläche und in der Luft angetrieben, kostet die Pflanze also praktisch keine eigene Energie. Zum anderen hat die Pflanze ihre Oberfläche je nach den Anforderungen in verschiedenster Weise auf Ersparnisse im Wasserdurchsatz hin ausgebildet.

Bei der regelbaren Wasserabgabe der Pflanzen (Transpiration) kommt es infolge der Dampfdruckunterschiede von H_2^{16}O und H_2^{18}O zu einer Fraktionierung. Dabei wird in der zurückbleibenden flüssigen Phase das H_2^{18}O gegenüber dem in das Blatt einfließenden Wasser angereichert. Da die Transpirationsrate der Pflanzen, bezogen auf die Fläche oder auf das Wasservolumen der Blätter, allgemein groß ist, sind die Fraktionierungseffekte stark ausgeprägt.

Derzeit sind Messungen der Sauerstoffisotopenfraktionierung bei der Photosynthese nur für Wasserpflanzen bekannt. Messungen an Laubblättern bereiten wir vor. Diese Arbeiten sind aber allein schon wegen der Überlagerungen von Photosynthese und Respiration schwierig. Für unsere geochemischen Modelle (WAGENER, 1974; FÖRSTEL und SCHLESER, 1974) nehmen wir die Anreicherung des H_2^{18}O -Gehaltes im Blattwasser als ^{18}O -Gehalt des von den Landpflanzen erzeugten Sauerstoffs an.

Bei der Deutung der H_2^{18}O -Anreicherung muß neben rein physikalischen Effekten sicherlich noch mit Einflüssen von Bau und Physiologie der Pflanze auf den Anreicherungsseffekt gerechnet werden. Bisherige Arbeiten (GONFIANTINI, GRATZUI und TONGIORGI, 1965; DONGMANN, FÖRSTEL und WAGENER, 1972; DONGMANN, NÜRNBERG, FÖRSTEL und WAGENER, 1974; LESANT, MERLIVAT, BRICOUT, FONTES und GAUTHERET, 1974) bringen nicht die enge zeitliche Folge der Meßpunkte über den ganzen Tag, die erst eine pflanzenphysiologische Bearbeitung ermöglicht.

Für die vorliegende Arbeit wurde jede halbe Stunde eine Blattprobe von zwei Laubbäumen entnommen. Es wurden Blätter einer Eiche (*Quercus robur L.*) und einer Birke (*Betula pubescens EHRH*) gepflückt. Laubbäume sind für uns von besonderem Interesse, da sie auf dem Land den größten Teil der photosynthetisch tätigen Biomasse darstellen. Das wird besonders deutlich, wenn man die Größe, die Produktivität und den Artenbestand der tropischen Wälder betrachtet.

Wir haben zwei Laubbäume ausgewählt, die dicht beieinander stehen. Sie zeigten den gleichen Tagesgang in Besonnung, Temperatur, Luftfeuchte und Wind. Die Äste der Probennahme waren in dieselbe Richtung orientiert (Südwesten). Außerdem waren Bodenverhältnisse und Bodenwasser identisch. Die Proben wurden über 30 Stunden während einer Hochdruckwetterlage genommen.

2. Material und Methode

2.1 Probennahme

Die beiden Versuchsbäume Eiche (*Quercus robur* L.) und Moorbirke (*Betula pubescens* EHRH.) wuchsen auf dem Gelände der KFA nordöstlich des Wetterturmes. Während der Probennahme herrschte eine anhaltende Hochdrucklage mit einem gleichmäßigen Tagesgang der Luftfeuchte und der Temperatur. Die Bäume standen eng benachbart. Dadurch wurden die nach Südwesten zeigenden Zweige gleich besonnt.

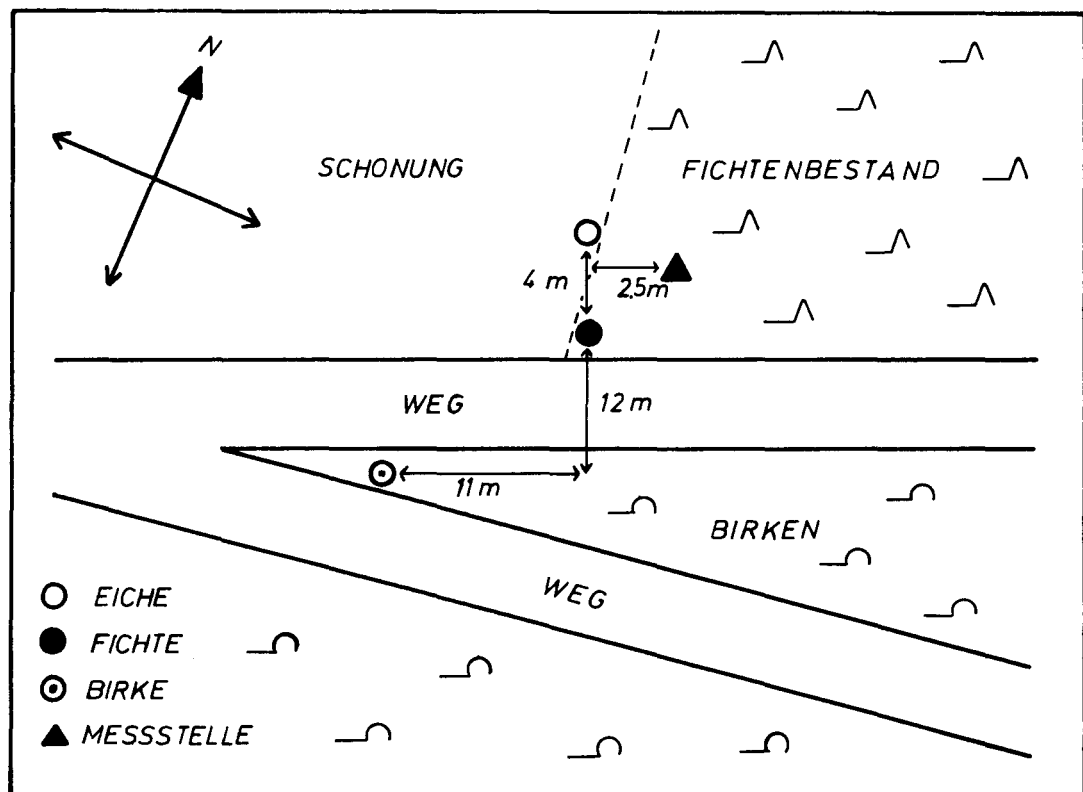


Abbildung 2.1: Skizze des Probenortes

- Eiche *Quercus robur* L.
 - Fichte *Betula pubescens* EHRH.
 - ⊙ Birke
 - ▲ Messstelle
- ▲ Meßstelle der Klimawerte im Bestand, gleichzeitig Kontrolle der Meßwerte in der Eiche.

Die Versuchszweige hingen 1,5 bis 2 m hoch. Jede halbe Stunde wurden Blätter mit Stiel in einen Schliffkolben gefüllt. Der Kolben wurde schnell verschlossen und möglichst rasch bei -18°C eingefroren. Schliffkolben wurden wegen der späteren Vakuumdestillation benutzt. Die Blattmenge muß über 2 g betragen, da ein Milliliter Wasser zur H_2^{18}O -Messung notwendig ist. Der Wassergehalt von Laubblättern beträgt etwa 50 %.

Den ab Mitternacht auftretenden Tau konnte man mit Zellstofftüchern gut von den Blättern abwischen. Astproben mußten nur in größeren Abständen genommen werden. Boden und Wurzeln wurden nur einmal während des Versuchs aus etwa 50 cm Tiefe genommen und wie die Blattproben behandelt. Die Daten für Temperatur und Luftfeuchte wurden mit einem Thermohydrographen der Firma Lamprecht, Göttingen, gemessen. Die Daten der Windgeschwindigkeit stammen von der Wetterstation der KFA.

2.2 Destillation

Das Wasser aus den Wurzel-, Boden-, Ast- und Blattproben gewinnt man durch Destillation unter Vakuum aus 60° C in eine mit flüssigem Stickstoff gekühlte Falle. Die Temperatur von 60° C vermeidet die Zersetzung des organischen Materials. Die verwendete Destillationsbrücke zeigt Abbildung 2.2.

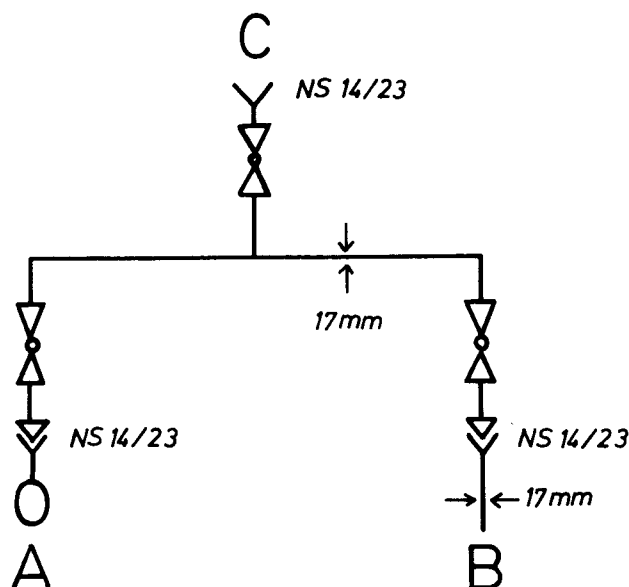


Abbildung 2.2: Destillationsbrücke

A: Probengefäß (60° C)
 B: Reagenzglas mit Schliff
 (mit flüssigem Stickstoff gekühlt)
 C: Anschluß an die Vakuumanlage
 (10⁻³ Torr)

Blatt-, Boden- oder Wurzelwasser werden wie folgt gewonnen: Das Probenmaterial wird in einem Trockeneis/Aceton-Gemisch eingefroren. Dabei werden bereits im Material gelöste Gase ausgetrieben. Dann wird das Gas in der gesamten Destillationsbrücke auf unter 10⁻³ Torr evakuiert. Der Hahn **C** wird geschlossen und die Destillationsbrücke zur Probengewinnung abgenommen. Das Probengefäß **A** wird in ein Wasserbad von 60° C, das Auffanggefäß **B** in flüssigen Stickstoff eingetaucht. Unter Vakuum diffundiert nun der Wasserdampf vollständig von **A** nach **B**. In **B** gefriert er sofort aus. Bei 60° C hat Wasser einen Partialdruck von 150 Torr, bei -60° C beträgt er 8 · 10⁻³ Torr. Unter Kühlung mit flüssigem Stickstoff friert aller Wasserdampf wieder aus.

Das Wasser destilliert nur in evakuierten und gasdichten Brücken vollständig über. Hält die Brücke das Vakuum nicht, so bildet sich im Glasrohr und in den Kühen Kondenswasser, das nicht mehr vollständig im Gefäß **B** gesammelt werden kann. Eine vollständige Sammlung in Gefäß **B** kann auch nicht durch Ausheizen der übrigen Brückenteile erreicht werden. Bei einer solchen unvollständigen Destillation tritt erfahrungsgemäß eine starke Erniedrigung der H₂¹⁸O-Werte auf.

Die Destillationsbrücken wurden allgemein über einen Tag lang im Wasserbad und im Dewar belassen. Das Destillat wurde danach aufgetaut und in dicht schließenden Gläschen abgefüllt. Bis zur weiteren Verwendung wurden die Proben tiefgefroren.

Durch Vorversuche wurde der Einfluß des Blattalters und des bei der Destillation mit erfaßten organischen Materials untersucht. Dazu wurden Fichtennadeln benutzt. Fichtennadeln können bis zu fünf Jahre alt werden. Junge und ältere Nadeln sind äußerlich deutlich unterscheidbar. Außerdem enthalten gerade Fichtennadeln besonders große Mengen leicht flüchtiger organischer Verbindungen, z.B. ätherische Öle.

Zum selben Zeitpunkt wurde jeweils eine größere Menge diesjähriger und vorjähriger Nadeln entnommen. Das Destillat wurde vereinigt und mehrere Proben davon entnommen. Das Ergebnis zeigt Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1

Vergleich diesjähriger und älterer Nadeln, die zum selben Zeitpunkt entnommen wurden (Werte bezogen auf SMOW)

diesjährige Nadeln ($\delta\text{H}_2^{18}\text{O} \text{ ‰}$)	ältere Nadeln ($\delta\text{H}_2^{18}\text{O} \text{ ‰}$)
-1.4	-1.4
-2.2	-3.8
-1.5	-4.4
-1.6	-4.2
-1.9	-
-1.7	-3.4

Der Unterschied von 2 ‰ zwischen diesjährigen und älteren Nadeln kann auf Unterschieden in der Physiologie jüngerer und älterer Nadeln beruhen. Physiologische Unterschiede sind mit Sicherheit an der Variation der Meßwerte beteiligt.

Das Destillat aus Blättern ist schwach sauer und leicht trüb. Aromastoffe sind schon am Geruch zu erkennen. Der saure pH wird wahrscheinlich durch organische Säuren, die bei 60° C mit überdestilliert werden, verursacht. Nach Zugabe von festem Kaliumpermanganat ist zunächst noch eine rötliche Färbung der Proben zu beobachten. Nach kurzer Zeit fällt Braunstein aus. Die Destillate aus verschiedenen Arten zeigen Unterschiede. Dabei wird besonders von den Nadeln der Fichte viel organisches Material abgegeben. Bei der manganometrischen Titration wurden 3 ml 0,1 N Kaliumpermanganatlösung für 100 ml Destillat verbraucht.

Der Einfluß des organischen Materials auf die massenspektrometrische Messung wurde durch folgenden Versuch ausgeschlossen: Eine größere Menge Nadeln wurde gepflückt und das Destillat aller Proben vereinigt. Das Destillat wurde einmal ohne weitere Behandlung dem CO_2 -Austausch zugeführt. Fünf andere Proben wurden mit festem Kaliumpermanganat versetzt und die Proben in Ampullen abgeschmolzen. Die Proben wurden über Nacht bei 100° C umgesetzt. Das Wasser wurde danach erneut destilliert und wie die übrigen Proben behandelt. In den Ampullen hatte sich Braunstein abgesetzt. Die Ergebnisse für die unbehandelten und für die mit Kaliumpermanganat umgesetzten Proben zeigt Tabelle 2.2.

Tabelle 2.2

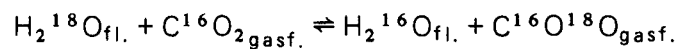
$\delta H_2^{18}O$ -Gehalt von gepooltem Blattwasser aus Fichtennadeln.
In 5 Proben wurde ein Teil des organischen Materials mit Kaliumpermanganat umgesetzt.

Blattproben unbehandelt ($\delta H_2^{18}O$ ‰)	Blattproben mit Kaliumpermanganat umgesetzt ($\delta H_2^{18}O$ ‰)
-2.3	
-3.1	-3.5
-2.3	-2.8
-2.2	-2.5
-3.8	-3.9
-2.6	-3.0
-1.3	—
-4.7	—
-5.3	—
-3.9	—
-2.5	—
-3.1	-3.1

2.3 Isotopenaustausch

Mit dem vorhandenen Massenspektrometer Micromass 602 C der Firma Vacuum Generators konnte Wasser nicht direkt gemessen werden. Deshalb wurde der $H_2^{18}O$ -Gehalt nach EPSTEIN und MAYEDA (1953) über den Umweg des Isotopenaustausches von flüssigem Wasser und gasförmigem CO_2 bestimmt. CO_2 hat unter anderem den Vorteil, daß es durch flüssigen Stickstoff leicht ausfrierbar und damit leicht handhabbar ist. Das Verfahren geht im wesentlichen auf DONGMANN (1973) zurück, wurde aber verändert.

Die Austauschreaktion für Wasser und gasförmiges CO_2 lautet:



Nach UREY (1947) wird der Trennfaktor α definiert als

$$\alpha = \frac{[C^{16}O^{18}O] [H_2^{18}O]}{2[C^{16}O_2] [H_2^{16}O]}$$

STACHWESKY hat die Temperaturabhängigkeit von α 1964 bestimmt:

Temperatur (° C)	α
5	1.047
25	1.042
40	1.039

Frühere Messungen (DONGMANN et al., 1974) wurden mit Hilfe von Austauschtemperaturen um 100° C durchgeführt. Beim Herausnehmen aus dem Ölbad kühlte die Probe aber stark ab. Da sich der Arbeitsgang durch Unterschiede in der Bedienung der Apparatur verschieden lang hinzog, wurden unkontrollierbare Einflüsse auf die Messung befürchtet. Deshalb ist eine Austauschtemperatur um 25° C gewählt worden. Zwar ist der Trennfaktor bedeutungslos, wenn alle Standard- und Meßwerte gleich behandelt werden, also der Austausch in einem thermostatisierten Wasserbad erfolgt. Arbeitet man aber nahe der Zimmertemperatur, so sind die Temperatureinflüsse des Austauschvorganges sowieso minimal.

Der Austausch wird wie folgt beschrieben durchgeführt. Das Austauschgefäß wird in Abbildung 2.3 beschrieben.

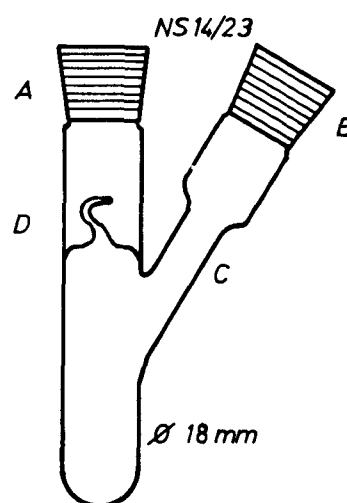
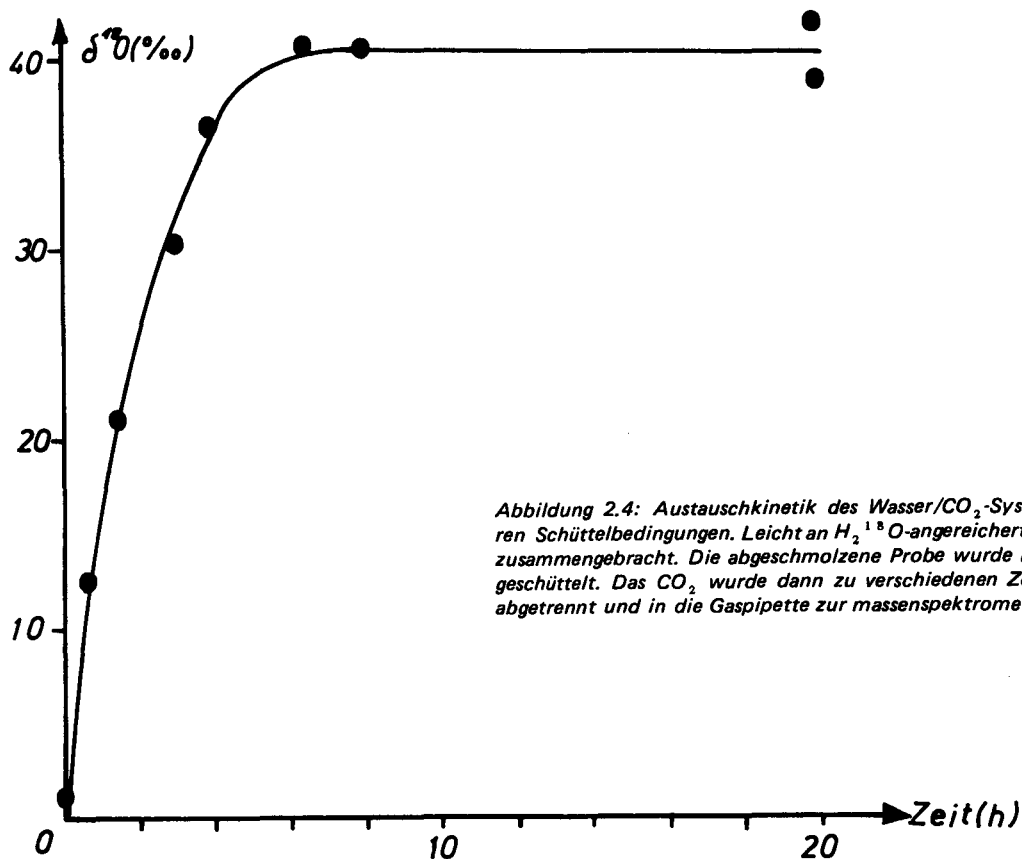


Abbildung 2.3: Austauschgefäß

Das Gefäß wird über Schliff B mit Wasser und CO₂ gefüllt und dann bei C abgeschmolzen. Nach dem Austausch im Wasserbad wird es mit Schliff A an die Vakuumanlage angesetzt und bei D aufgebrochen.

1 ml Wasserprobe wird durch die Verengung C in das Glasgefäß gegeben. Dann wird das Gefäß mit der Hülse B an die Vakuumanlage bei I (Abb. 2.7) angesetzt. Die Wasserprobe wurde mit Aceton/Trockeneis eingefroren. Die ausgetriebenen Gase und die eingeschlossene Luft wurden auf unter 10⁻³ Torr abgepumpt. Die Wasserprobe wird noch einmal aufgetaut und wieder eingefroren, um weitere in der Probe gelöste Gase auszutreiben. Dann läßt man aus dem CO₂-Reservoir E (Abb. 2.7) über den Hahn 2 bei geschlossenen Hähnen 1, 3 und 4 in ein Volumen von 476 ml 13 Torr CO₂ ein. Nach Öffnen von Hahn 1 wird das CO₂ mit flüssigem Stickstoff im Probengefäß ausgefroren. Nach D'ANS-LAX beträgt der Dampfdruck von CO₂ bei -150° C 0,1 Torr und bei -78° C 760 Torr. Die CO₂-Menge hängt unter anderem von den Bedingungen des Einlaßdruckes des Massenspektrometers ab.

Die Probe wird bei der Verengung C abgeschmolzen und damit gasdicht verschlossen. Der Austausch wird in einem Wasserbad bei 25° C durchgeführt. Der zeitliche Verlauf der Einstellung des Austauschgleichgewichtes hängt von der Temperatur und der Intensität des Schüttelns selbst ab. Wir haben nicht sehr intensiv geschüttelt. Das Austauschgleichgewicht hatte sich dennoch schon nach 7 bis 8 Stunden eingestellt. Die Kinetik gibt Abbildung 2.4 wieder. Sie wurde mit leicht H₂¹⁸O angereichertem Wasser aufgenommen.



Nach mindestens einer Nacht im Schüttelbad wird das Probengefäß bei *D* aufgebrochen und das CO₂ abgetrennt. Der Wasserdampf wird fraktioniert ausgefroren. Dieses Ausfrieren muß sorgfältig geschehen, da der Wasserdampf die Funktion des Massenspektrometers beeinträchtigt. Mit Schliff *A* wird das Gefäß an Schliff II der Vakuumapparatur (Abb. 2.7) angeschlossen, und das Probengefäß wird oberhalb *D* evakuiert. Nach Schließen der Hähne 5 und 6 wird der Verschluß mit einem fallenden Magneten aufgebrochen. Das CO₂ und der Wasserdampf werden in die Falle *G* in flüssigen Stickstoff übergefroren. Nach Abschluß der Falle *G* wird die eingefrorene Probe aufgetaut und wieder mit Aceton/Trockeneis ausgefroren. Das CO₂ wird in die nächste Falle überfroren. Der Vorgang wird jetzt in den Fallen *H* und *J* wiederholt. Letztlich wird das CO₂ mit flüssigem Stickstoff in die Gaspipette an Schliff I zur massenspektrometrischen Messung überfroren. Die Meßpipette wird in Abbildung 2.5 dargestellt.

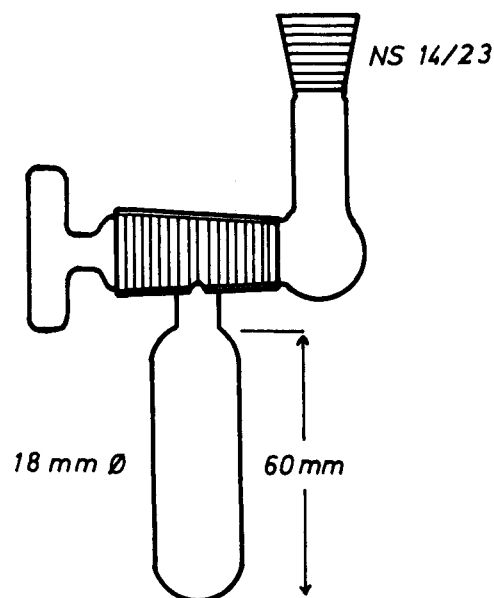


Abbildung 2.5: Gaspipette zur Aufbewahrung der CO₂-Proben für die massenspektrometrische Messung.

Von den eingefüllten 13 Torr im konstanten Volumen von 476 ml werden allgemein 12 Torr zurückgewonnen. Die Gaspipette kann längere Zeit aufbewahrt werden. Verluste können lediglich durch Fehler beim Fetten der Hähne auftreten. Identische Proben ergaben über 14 Tage gemessen das gleiche Ergebnis.

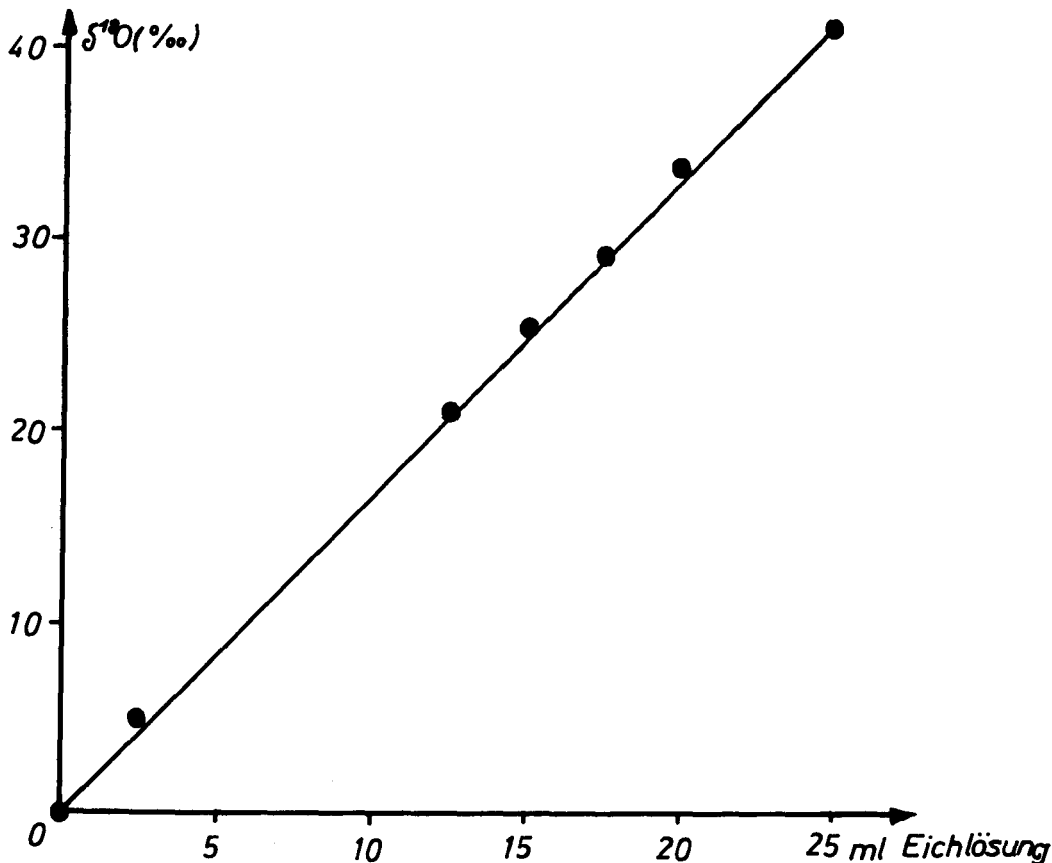
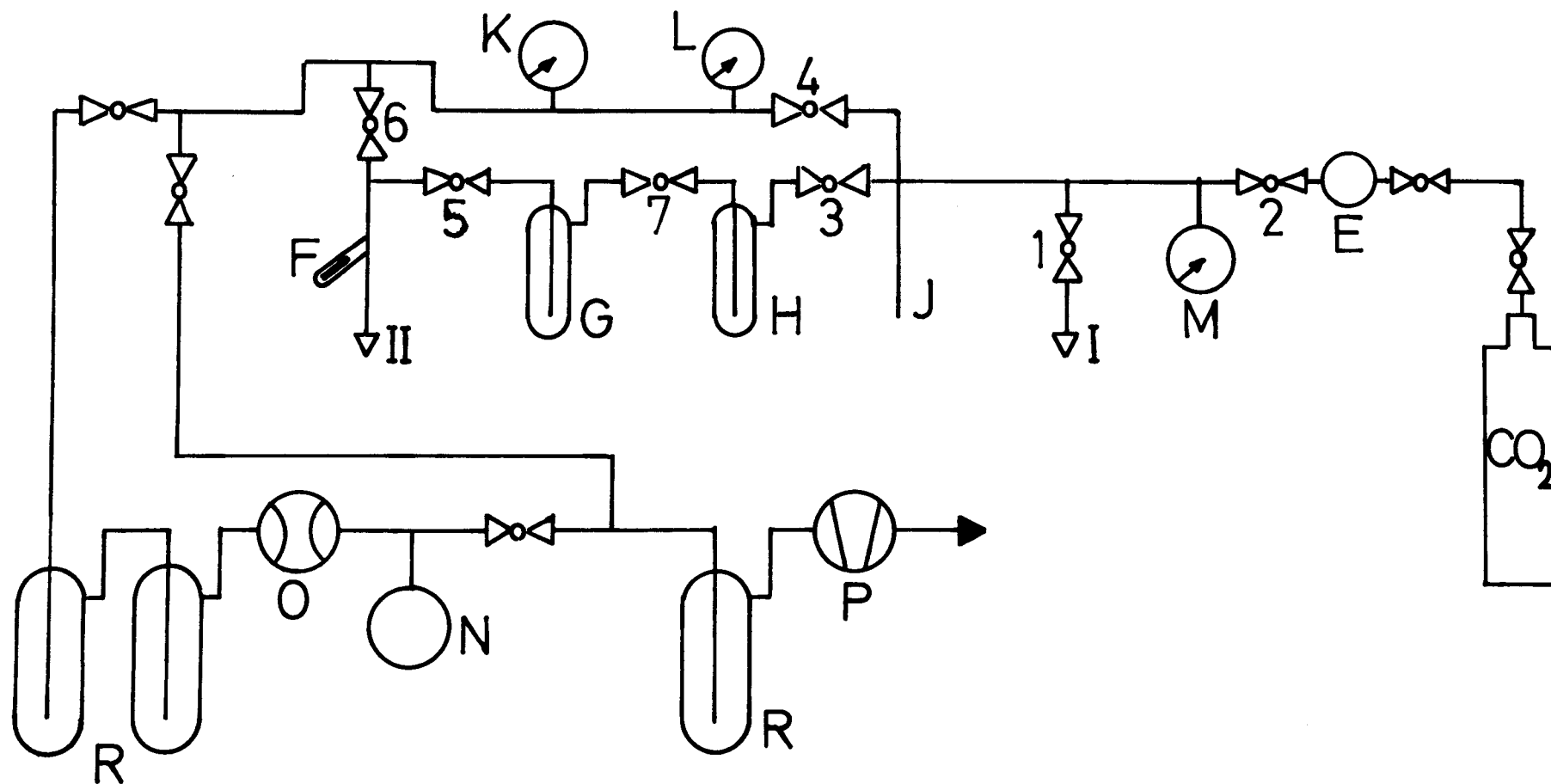


Abbildung 2.6: Linearität des Austauschverfahrens

Mit angereichertem H_2^{18}O wurde eine Verdünnungsreihe in natürlichem Wasser hergestellt. Man erhält bei den Meßwerten im Bereich natürlicher Variationen proportionale Werte. Die Werte sind auf ein natürliches Wasser aus Jülich bezogen.

Die Linearität der Methode wurde durch eine Verdünnungsreihe aus 1,7 % H_2^{18}O mit natürlichem Wasser getestet. Abbildung 2.6 zeigt, daß das Austauschverfahren den H_2^{18}O -Gehalt proportional wiedergibt, zumindest im Bereich natürlicher Variation des H_2^{18}O -Gehaltes.

In Abbildung 2.7 wird die Vakuumapparatur zur Probenaufbereitung dargestellt. Sie kann als Vakuumanlage zum Auspumpen der Destillationsbrücken ebenso wie als Anlage zur Probenbehandlung vor und nach dem Austausch benutzt werden.



G,H,R KÜHLFALLEN

P VORPUMPE

O DIFFUSIONSPUMPE

N BALLASTGEFÄSS

M ABSOLUTDRUCKMESSER

K,L MESSRÖHREN FÜR ELEKTRONEN-
DRUCKMESSER

E CO₂-RESERVOIR

F EISENSTAB

J GLASROHR

1-7 SCHLIEßHÄHNEN

I,II ANSCHLÜSSE FÜR
PROBENGEFÄSSE

Abbildung 2.7: Vakuumapparatur zur Aufbereitung der Wasserproben für die massenspektrometrische Messung.

2.4 Massenspektrometrie

Für die Isotopenverhältnismessung wird das Massenspektrometer MICROMASS 602 C der Firma Vacuum Generators benutzt. Die Daten des Massenspektrometers werden im Anhang zusammengestellt. Auf den Doppelauffänger fallen die Ionen mit den Massen

Auffänger 1	{	44	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2^+$
		45	$^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2^+, ^{12}\text{C}^{17}\text{O}^{16}\text{O}^+$
Auffänger 2		46	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}^+$

Ein konstantes $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ -Verhältnis im CO_2 -Meßgas ist Voraussetzung der Methode. Andere Ionenkombinationen als die oben dargestellten sind wegen ihres geringen Vorkommens bei der Auswertung vernachlässigbar.

Das Doppel-Einlaßsystem wird sechsmal zwischen Proben- und Laborstandardgas umgeschaltet. Die Abweichung wird mit Hilfe eines Rechenprogramms errechnet und als δ -Wert gegenüber dem SMOW (wenn nicht anders vermerkt) angegeben:

$$\delta (\text{‰}) = \frac{R_{\text{Probe}} - R_{\text{Standard}}}{R_{\text{Standard}}} \cdot 10^3$$

R : Isotopenverhältnis der Massenpeaks
44 + 45 / 46

Bezugswert im Alltag ist ein Laborstandard. Für die Angaben der H_2^{18}O -Anreicherungen im Blattwasser muß auf SMOW (CRAIG, 1961) umgerechnet werden.

2.5 Standardisierung

Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte werden üblicherweise nach CRAIG (1961) auf SMOW (Standard Mean Ocean Water) bezogen. Das tiefere Wasser der Ozeane hat eine konstante Zusammensetzung. Eigene Messungen im Rahmen der Meteorfahrt **Overflow 73** über dem Island-Faröer-Rücken haben dies bestätigt.

In der Routine wurden die Werte mit einer größeren Wassermenge als Laborstandard (L.S.) verglichen. Im Verlaufe der Messung wurde mehrfach das Verhältnis zum SMOW bestimmt. Tabelle 2.3 zeigt Vergleiche vom Laborstandard gegen SMOW. Die Werte wurden an verschiedenen Tagen

gemessen. Das Ergebnis zeigt, daß der Laborstandard mit -7‰ unter dem SMOW liegt. Das entspricht dem längerfristigen Durchschnitt für Niederschläge in Mitteleuropa, sowohl nach eigenen Messungen als auch nach Messungen der IAEA (1969).

Tabelle 2.3

Vergleich von Laborstandard (L.S.) mit einem SMOW der IAEA, Wien.

Die Messungen wurden an verschiedenen Tagen gegen im Standard- CO_2 -Gas aus einer üblichen Gasflasche verglichen.

$\delta \text{H}_2^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} (\text{‰})$	$\delta \text{H}_2^{18}\text{O}_{\text{L.S.}} (\text{‰})$	Differenz (‰)
7.3	0.1	7.2
7.9	0.3	7.6
7.8	0.3	7.5
8.7	0.4	8.3
8.3	0.6	7.7
7.4	0.0	7.4
7.5	0.2	7.3
Mittelwert $\pm$ Standardabweichung		7.6 ± 0.4

3. Meßergebnisse

In den Abbildungen 3.1 und 3.2 werden die Messungen der H_2^{18}O -Werte im Blattwasser der beiden Bäume dargestellt. Alle $\delta^{18}\text{O}$ -Werte beziehen sich auf SMOW. Die Kurven wurden von Hand gezogen und dabei optisch gemittelt. Um die Wendepunkte der Kurve deuten zu können, wurden die Extremwerte für die Temperatur und die Luftfeuchte mit eingezeichnet. Ebenso wird das Zeitintervall angegeben, in dem 100 % relative Luftfeuchte herrscht.

Die H_2^{18}O -Anreicherung im Blattwasser baut sich auf dem ins Blatt einfließenden Wasser, dem Astwasser, auf. Dessen H_2^{18}O -Gehalt wurde gestrichelt eingezeichnet. Die Werte für das Boden- und Wurzelwasser liegen noch im Streubereich der Meßwerte der Astwasserproben.

Während des Versuchs gemessene Wasserproben aus den Ästen der Birke und der Eiche stimmen mit den Messungen an einer benachbarten jüngeren Fichte überein (Tabelle 3.1). Die Meßwerte der Bodenwasser- und Wurzelwasserproben liegen tiefer als die der Astwasserproben. Doch ist es allgemein schwer, Proben aus dem gleichen Wasserleitungssystem zu erhalten. Die Zuordnung der Wurzeln ist nicht eindeutig möglich, wenn man nur einfache Grabungen durchführt. Der jahreszeitlich in seinem H_2^{18}O -Gehalt variierende Regen wird in aufeinanderfolgenden Schichten abgelagert. Niederschläge aus kälteren Perioden mit niedrigen $\delta^{18}\text{O}$ -Werten wechseln mit Bodenwasserschichten wärmerer Perioden. Inwieweit eine bestimmte Schicht gerade von der Pflanze aufgenommen wird, kann aus den nur zu einer Zeit durchgeführten Messungen nicht geschlossen werden. Nach den vorliegenden Messungen kann eine geringe Fraktionierung beim Transport nicht ausgeschlossen werden. Ausschlaggebend für unsere Überlegungen aber war, daß der Meßwert des Astwassers mit dem langjährigen Mittelwert eigener und dem Mittelwert der IAEA-Messungen (IAEA 1969) übereinstimmte, so daß wir Ast- und Bodenwasser als gleich ansahen.

Tabelle 3.1

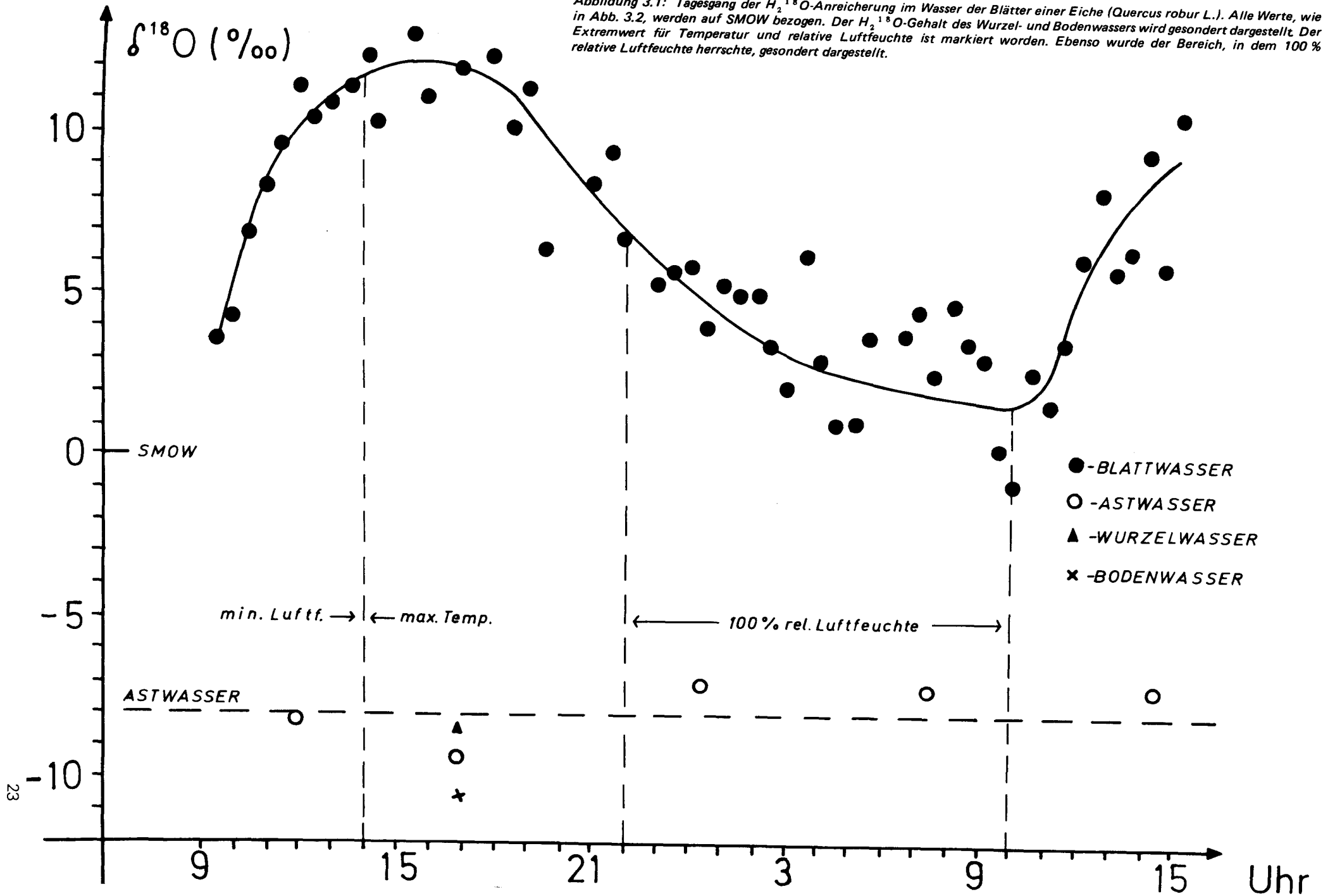
$\delta\text{H}_2^{18}\text{O}$ -Gehalte in den Wasserproben aus
Ast-, Wurzel- und Blattproben: Werte bezogen auf SMOW

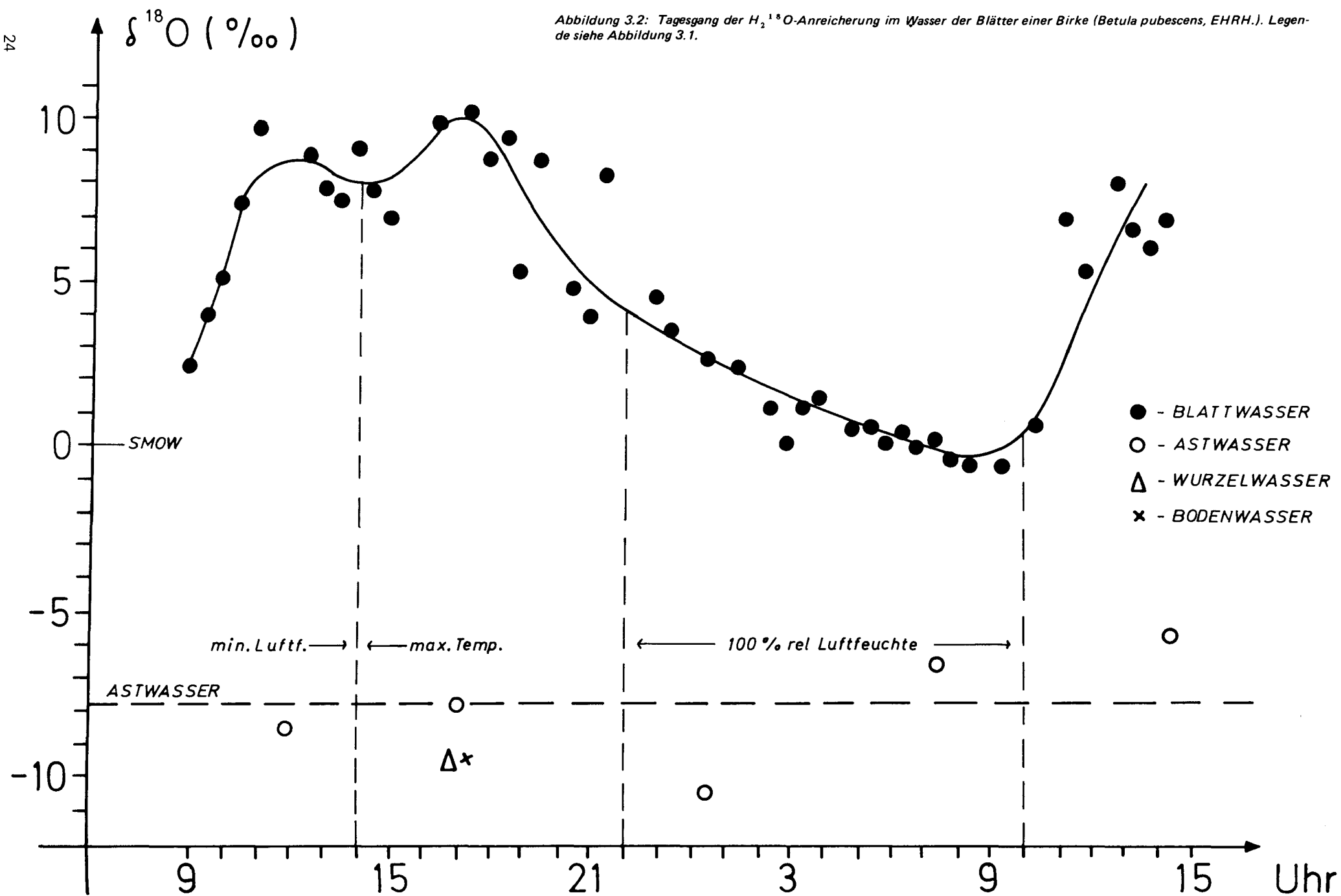
	Birke	Eiche	Fichte
Boden	−9.5	−10.6	−10.2
Wurzel	−9.5	− 8.4	−11.9
Ast (n =)	−8.0 (5)	− 7.9 (5)	− 7.2 (4)

Die Klimawerte der Tagesgänge werden in Abbildung 3.3 dargestellt. Als Werte für Temperatur und relative Luftfeuchte werden diejenigen am Probenort (Bestandsrand) angegeben. Die Werte der KFA-Wetterstelle wichen etwas davon ab, sie werden anders als die im Bestand über einem größeren Stück Wiese gemessen. Die relative Luftfeuchte lag am Probenort während 12 Stunden durchgehend bei 100 % relativer Feuchte. Das konnte an der Bildung von Nebel ab Mitternacht und am Niederschlag von Tau gegen Morgen schon rein äußerlich gesehen werden. Für die übrige Zeit ist in Abbildung 3.3 deutlich die Korrelation zwischen Temperatur und Luftfeuchte erkennbar.

Die Windgeschwindigkeiten erhielten wir vom Wetterdienst der KFA, dem wir herzlich dafür danken. Es sind Mittelwerte jeweils über eine Stunde, gemessen in 30 m Höhe, oberhalb der Baumgrenze. Eine direkte Abhängigkeit zwischen Windgeschwindigkeit einerseits und Temperatur bzw. Luftfeuchte andererseits war nicht zu erkennen. Nach späteren Erfahrungen im Solling (IBP-Meßstelle B 1) unterscheiden sich die Windgeschwindigkeiten innerhalb des Bestandes und darüber sehr deutlich. So kommt den KFA-Messungen in 30 m Höhe nur eine relative Bedeutung für die Beurteilung der Gesamtwetterlage zu. Die einzelnen Meßwerte werden im Anhang zusammengestellt. Sie sind so für weitere Rechnungen zugänglich. Die Ergebnisse werden in Kapitel 4 diskutiert.

Abbildung 3.1: Tagesgang der $H_2^{18}O$ -Anreicherung im Wasser der Blätter einer Eiche (*Quercus robur* L.). Alle Werte, wie in Abb. 3.2, werden auf SMOW bezogen. Der $H_2^{18}O$ -Gehalt des Wurzel- und Bodenwassers wird gesondert dargestellt. Der Extremwert für Temperatur und relative Luftfeuchte ist markiert worden. Ebenso wurde der Bereich, in dem 100 % relative Luftfeuchte herrschte, gesondert dargestellt.





Rel. Luftfeuchte und Temperatur am Bestandsrand

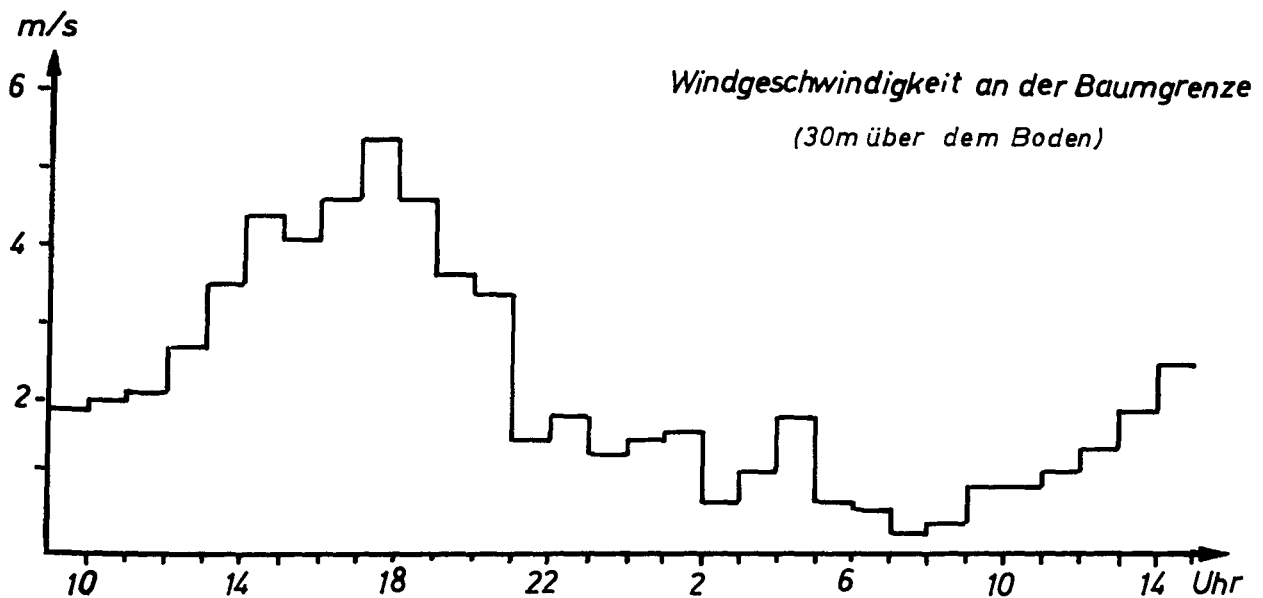
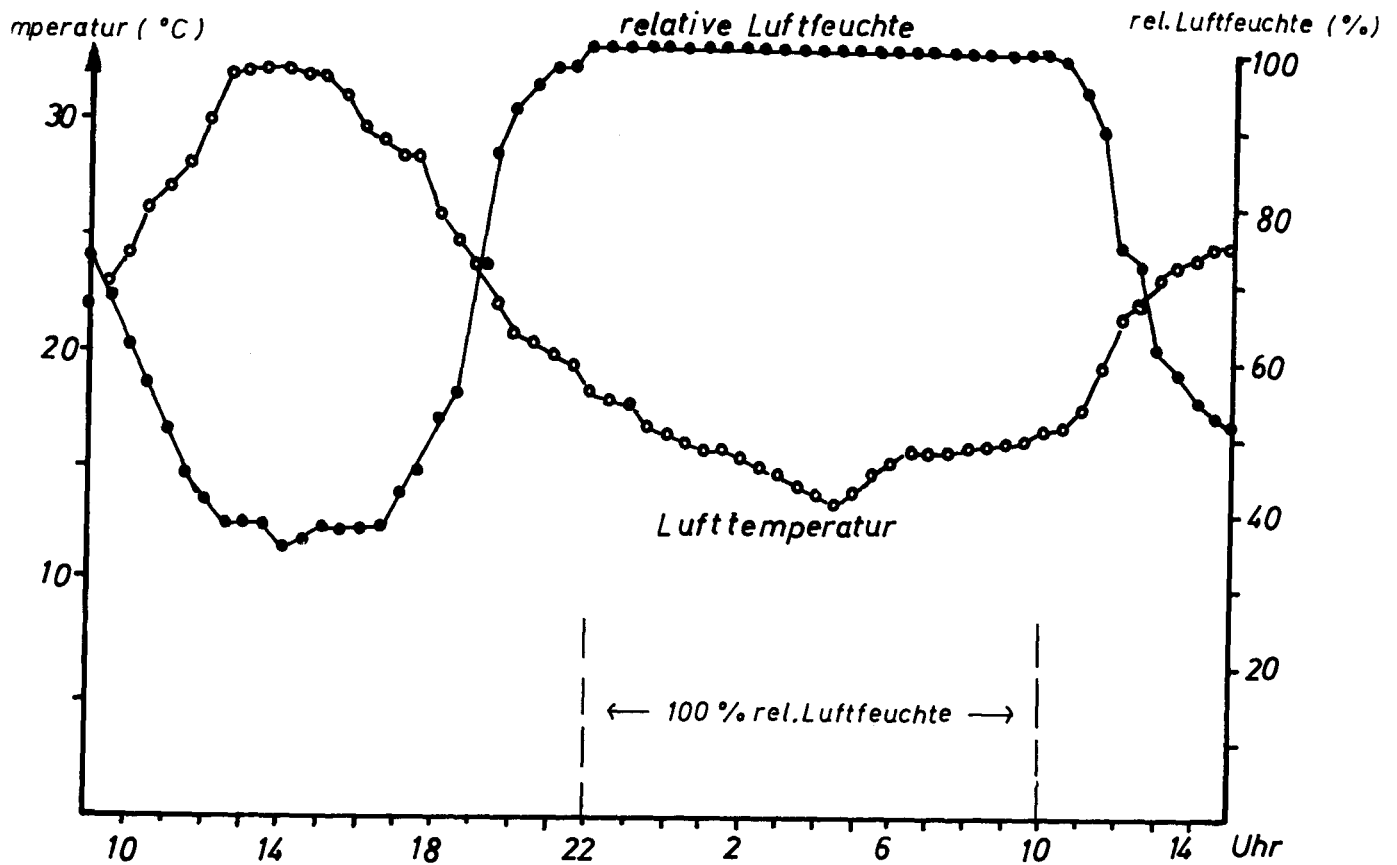


Abbildung 3.3: Zusammenstellung von Klimadaten am Versuchstage. Die Werte für die Temperatur und die relative Luftfeuchte wurden am Bestandsrand gemessen. Die Windgeschwindigkeiten wurden vom Wetterdienst der KFA aus stündlichen Mitteln in 30 m Höhe entnommen. Die Korrelation zwischen Temperatur und relativer Luftfeuchte ist deutlich zu sehen.

4. Diskussion

Für die bisher veröffentlichten Tagesgänge des H_2^{18}O -Gehaltes im Blattwasser (DONGMANN et al., 1974) wurden nur alle 2 Stunden Proben genommen. Bei der Probenaufbereitung mußte noch eine bestimmte Ausfallquote in Kauf genommen werden. An dieser Arbeit ist neu, daß die Meßpunkte in der dichten Folge jeweils einer halben Stunde genommen wurden. Man kann dann nicht einfach einen streng periodischen Tagesverlauf zur Auswertung anwenden, sondern muß die Anreicherung differenzierter betrachten.

Grundsätzlich zeigen die H_2^{18}O -Tagesgänge der Birke und der Eiche den gleichen Verlauf. Vom Mittag des ersten Versuchstages bis zum nächsten Morgen sind die Anreicherungen im Blattwasser der Eiche lediglich um 2 ‰ höher als im Blattwasser der Birke.

Bei beiden Versuchsobjekten wird während des Vormittags ein steiler, praktisch geradliniger Anstieg der H_2^{18}O -Konzentration im Blattwasser beider Bäume beobachtet. Zur Mittagszeit flacht dieser Anstieg dann ab. Hierbei zeigen die δ -Werte der Birke eine Einsenkung, die an eine zweigipflige Transpirationskurve erinnert.

Man muß bei der Interpretation der Messungen allerdings den Streubereich der Meßwerte berücksichtigen. Die Ursache der Streuung liegt einerseits in Unterschieden des Mikroklimas der Blattproben und physiologischen Variationen innerhalb eines Baumes, zum anderen auch in Fehlern bei der Probenaufbereitung und bei der massenspektrometrischen Messung.

Die Größe des Fehlers bei der Probenaufbereitung und -messung konnte aus 4 bzw. 5 Messungen zweier Fichtennadel-Proben abgeschätzt werden. Zwei größere Blattproben von diesjährigen und älteren Nadeln wurden getrennt destilliert und danach mehrfach gemessen. Am Tag der Probenahme herrschte naßkaltes Wetter, die Transpiration war sicherlich gering. Tabelle 4.1 zeigt die Meßwerte.

Tabelle 4.1

*H_2^{18}O - Gehalt älterer und diesjähriger Nadeln einer Fichte.
Die Proben einer Nadelsorte wurden gepoolt, jeweils getrennt
destilliert und gemessen. Alle Werte relativ zu SMOW.*

ältere Nadeln ($\delta\text{H}_2^{18}\text{O}$ ‰)	diesjährige Nadeln ($\delta\text{H}_2^{18}\text{O}$ ‰)
7.3	7.7
7.8	9.8
6.2	6.2
7.7	7.6
—	8.8
7.3 ± 0.7	8.0 ± 1.4

Die Standardabweichungen $\pm 0,7$ ‰ und $\pm 1,4$ ‰ geben den Streubereich der Probenaufbereitung und Messung an.

Ab 16.00 bis 17.00 Uhr wurde im untersuchten Tagesgang die Anreicherung des H_2^{18}O wieder abgebaut. Ab 17.00 Uhr stieg auch die relative Luftfeuchte wieder an. Der Abfall der H_2^{18}O -Anreicherung fällt mit dem Anstieg der relativen Luftfeuchte zusammen. Der Gang der relativen Luftfeuchte unterhalb 100 % erscheint uns am Versuchstag als symmetrisch. Dagegen ist der Gang des H_2^{18}O -Gehaltes im Blattwasser anders. Der Anstieg ist gegenüber dem Abfall wesentlich steiler.

Besonders interessierte uns das Verhalten des Versuchsmaterials während der relativen Feuchte von 100 %. Wir nehmen zunächst an, daß hier ein Austausch mit der Luftfeuchte oder ein Austausch mit direkt auf der Blattoberfläche niedergeschlagenem Tau erfolgt. Sicherlich sind auch andere Deutungen des Abfalls im $\delta^{18}\text{O}$ -Gehalt während dieses Zeitraumes denkbar. Wir bevorzugen hier die Vorstellung eines Austausches von Blattwasser und Luftfeuchte außerhalb des Blattes.

Vergleicht man die Abweichungen während einer relativen Luftfeuchte von 100 %, so können die in Abbildung 4.2 dargestellten Geradengleichungen erhalten werden.

Tabelle 4.2

*H_2^{18}O -Abreicherung während 100 % relativer Luftfeuchte
im beschriebenen Versuch*

	Birke	Eiche
Zeitraum (Uhrzeit)	22.00 bis 10.00	22.00 bis 10.00
Abreicherung in $\delta\text{H}_2^{18}\text{O} \text{ ‰}$ (t in Stunden)	$-0.36 t + 6.1$	$-0.44 t + 3.8$
Abreicherung in 12 Stunden (‰)	5.3	4.3

Zumindest für die Meßwerte im Blattwasser der Birke kann die Abreicherung an H_2^{18}O durch eine Gerade beschrieben werden (Abbildung 4.1). Die Meßwerte für das Blattwasser der Eiche zeigen eine größere Streuung als die des Wassers der Birkenblätter (Abbildung 4.2).

Aus den vorliegenden Meßwerten sollten nur mit Vorsicht Schlüsse auf die physikalischen und physiologischen Vorgänge gezogen werden. Es ist nicht mehr zu klären, ob sich während der gesamten Zeit mit 100 % relativer Luftfeuchte die gesamte Zeit über Feuchtigkeit direkt auf den Blättern niedergeschlagen hatte. Nach bisher von uns noch nicht veröffentlichten Messungen sollte der ^{18}O -Gehalt einen Wert von etwa -17 ‰ gegenüber SMOW gehabt haben. Dies geht aus der Annahme hervor, daß die Luftfeuchte etwa den Gleichgewichtswert für dampfförmiges Wasser gegenüber dem Niederschlag hat. Das wurde in längerfristigen Messungen in Jülich bestätigt. Der ^{18}O -Gehalt im Astwasser hat mit -7 ‰ bis -8 ‰ gegenüber SMOW einen Wert, den wir in den Niederschlägen über längere Zeit als Durchschnittswert gemessen haben. So erscheint uns der Wert des Astwassers als repräsentativ für die H_2^{18}O -Werte der Niederschläge.

Abb. 4.1: Abnahme der $\delta\text{-H}_2^{18}\text{O}$ Werte im Blattwasser der Birke von 22.00 bis 10.00 Uhr

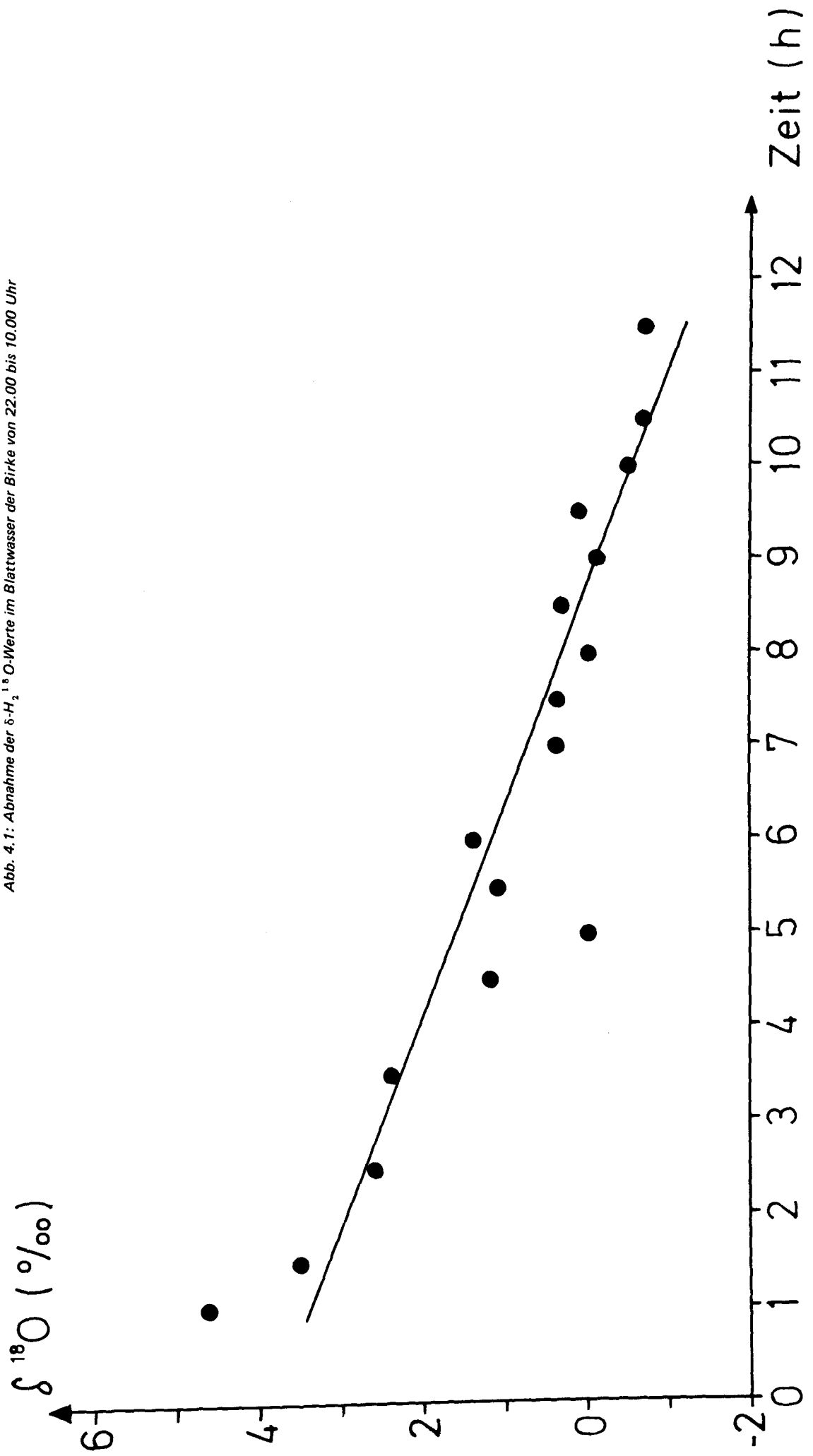
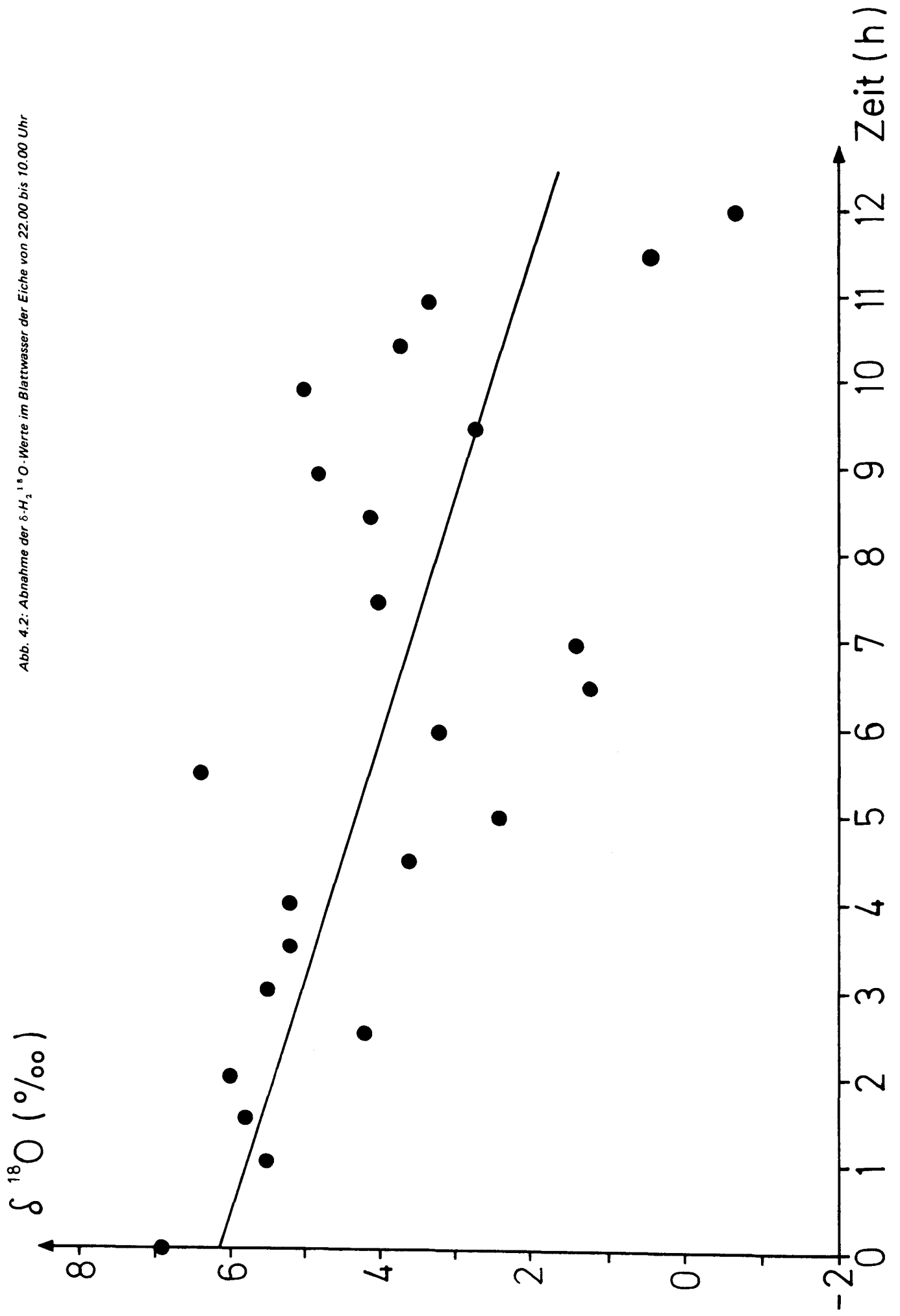


Abb. 4.2: Abnahme der $\delta\text{-H}_2^{18}\text{O}$ -Werte im Blattwasser der Eiche von 22.00 bis 10.00 Uhr



Änderungen im H_2^{18}O -Gehalt der Luftfeuchte während der Bildung von Tau oder Nebel haben wir noch nicht verfolgt. Wir nehmen aber als einfachsten Fall für den Tau an, daß er den Gleichgewichtswert mit der Luftfeuchte darstellt. Das bedeutet, daß er einen dem Astwasser entsprechenden $\delta^{18}\text{O}$ -Wert haben müßte (-8‰).

Nimmt man einen linear verlaufenden Austausch über die gesamte Zeit mit 100 % relativer Feuchte an, so sind zwei Endwerte des Austausches denkbar. Einmal ein Austausch bis auf den $\delta^{18}\text{O}$ -Wert für ausgefallenen Tau von -7‰ . Dieser müßte für die Birke 39 und für die Eiche 28 Stunden dauern, vorausgesetzt, der ^{18}O -Gehalt im Tau bleibt konstant und wird vom Blattwasser nicht beeinflusst bzw. äquilibriert sich ständig mit dem Wasserdampf der Luftfeuchte. Zusammenfassend kann man sagen, daß der Austausch mit dem Tau 1 bis 2 Tage dauern sollte. Äquilibriert sich das Blattwasser auf den Wert der Luftfeuchte von -17‰ , sollte dies sogar 2 bis 3 Tage dauern.

Wir nehmen an, daß während dieses langsamen Abfalls die Transpiration der Pflanze praktisch ruht und den Vorgang kaum beeinflusst. Man muß allerdings beachten, daß diese Messungen Freilandbeobachtungen sind. Die Versuchsbedingungen sind mit Sicherheit nicht vollständig bekannt. Sowohl biologische Besonderheiten der Versuchsbäume als auch Variation von Umweltparametern beeinflussen das Ergebnis.

Die Meßwerte für 100 % relativer Feuchte wurden aus den übrigen Daten herausgezogen, da dieser Zustand nicht voll definiert ist. Über die Sättigungskonzentration hinaus können höhere Wasserdampfkonzentrationen in der Volumeneinheit enthalten sein. Nebel zum Beispiel wird durch Feuchtemessungen allein nicht erfaßt.

Besondere Bedeutung wurde einer Bestimmung der Grenzwerte der H_2^{18}O -Anreicherung mit Hilfe des von DONGMANN (1973) und DONGMANN et al (1974) dargestellten Modells zugemessen. Die H_2^{18}O -Anreicherung im Blattwasser hängt von dem H_2^{18}O -Gehalt der Luftfeuchte (δ_L) und der relativen Feuchte h ab. Nimmt man jeweils einen stationären Zustand für das Blattwasser (δ_{BI}) an, so ergibt sich:

$$\delta_{BI} = \epsilon_g + \epsilon_K + (\delta_L - \epsilon_K) h + \delta_S$$

ϵ_g : Gleichgewichtsanreicherung (‰)

ϵ_K : kinetische Anreicherung (‰)

h : relative Luftfeuchte

δ_L : H_2^{18}O -Gehalt der Luftfeuchte (‰)

δ_S : Bezugswert des Astwassers zu SMOW (‰)

Schließt man die δ -Werte während 100 % relativer Feuchte von der Betrachtung aus und bezieht alle Werte auf das einlaufende Astwasser als Basiswert der Anreicherung, so kann man ϵ_g und ϵ_K extrapolieren. Für

$$h = 0 \text{ ist } \delta_{BI} = \epsilon_g + \epsilon_K$$

und für

$$h = 1 \text{ ist } \delta_{BI} = \epsilon_g + \delta_L$$

Die Anreicherung stellt bei konstantem δ_L eine Gerade für δ_{BI} gegenüber h dar.

Abbildung 4.3 zeigt die Meßwerte für den gesamten Tagesgang ohne die Meßwerte bei 100 % relativer Feuchte; in Abbildung 4.4 wurden noch die Meßwerte während der **Depression** zwischen 12.00 und 17.00 Uhr weggelassen. Abbildung 4.5 gibt die Messungen an der Eiche wieder.

Aus den Korrelationsrechnungen ergibt sich Tabelle 4.3.

Tabelle 4.3

Ergebnisse der Korrelationsrechnungen für Birke und Eiche, bezogen auf Astwasser. Alle Rechnungen ohne die Messungen bei 100 % relativer Feuchte. Die Streuungen wurden als Konfidenzintervalle von 95 % errechnet.

	Birke allgemein	Birke ohne 12.00–17.00	Eiche
Korrelations- koeffizient	–0.77	–0.77	–0.76
δ für $h = 0$ (‰)	20 ± 1.5	22 ± 1.8	24 ± 2.2
$\epsilon_K = \delta(h=0) - \epsilon_g$ (‰) ($\epsilon_g = 9$ ‰)	11	13	15
δ für $h = 1$ (‰)	12 ± 1.2	11 ± 1.4	12 ± 1.8

Die theoretischen Werte für den kinetischen Effekt ϵ_K liegen über 16 ‰ . Ohne die **Mittagsdepression** der Birke werden solche Werte fast erreicht.

Für eine relative Feuchte von $h = 1$ müßten die Werte, bezogen auf Astwasser, nach unserer einfachen Annahme stationärer Werte lauten:

$$\begin{aligned} \delta &= \epsilon_g + \delta_L \\ \delta_L &= -\epsilon_g, \\ \text{also} \quad \delta &= 0. \end{aligned}$$

Dies ist nicht der Fall. Das kann erklärlich sein aus der geringen Einstellgeschwindigkeit bei höheren Feuchten, also bei geringeren Transpirationsraten.

Eine differenzierte Betrachtung der An- und Abreicherungsvorgänge scheint uns möglich bzw. notwendig zu sein. In Abbildung 4.6 unterscheiden wir drei Phasen:

1. einen steilen, morgendlichen Anstieg,
2. eine langsame, abendliche Abreicherung und
3. einen nächtlichen Austausch.

Abb. 4.3: Korrelation aller $H_2^{18}O$ -Meßwerte der Birke mit der relativen Luftfeuchte

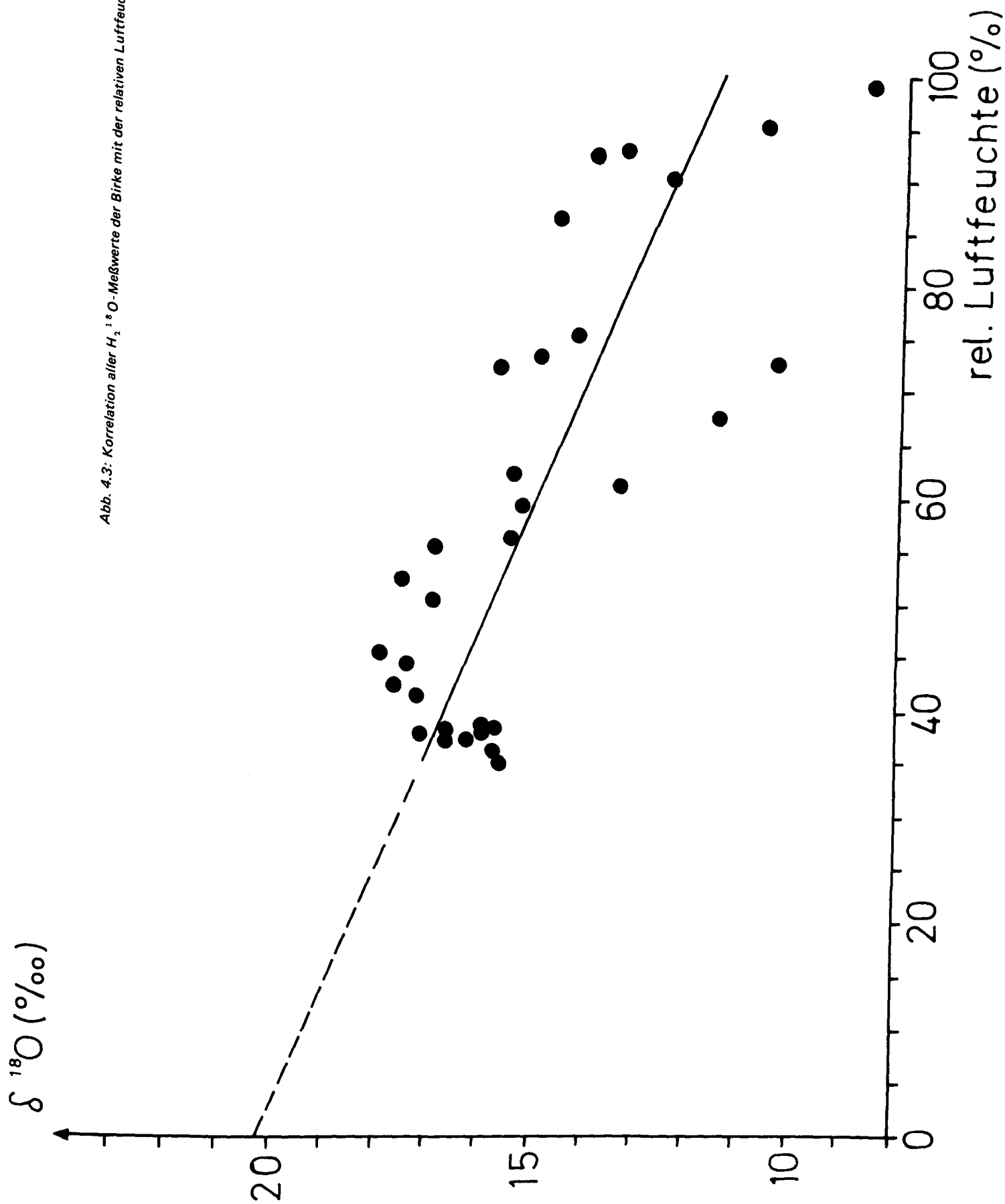


Abb. 4.4: Korrelation der $H_2^{18}O$ -Anreicherung der Birke mit der Luftfeuchte
(außer Meßwerte für 12.00 bis 17.00 Uhr)

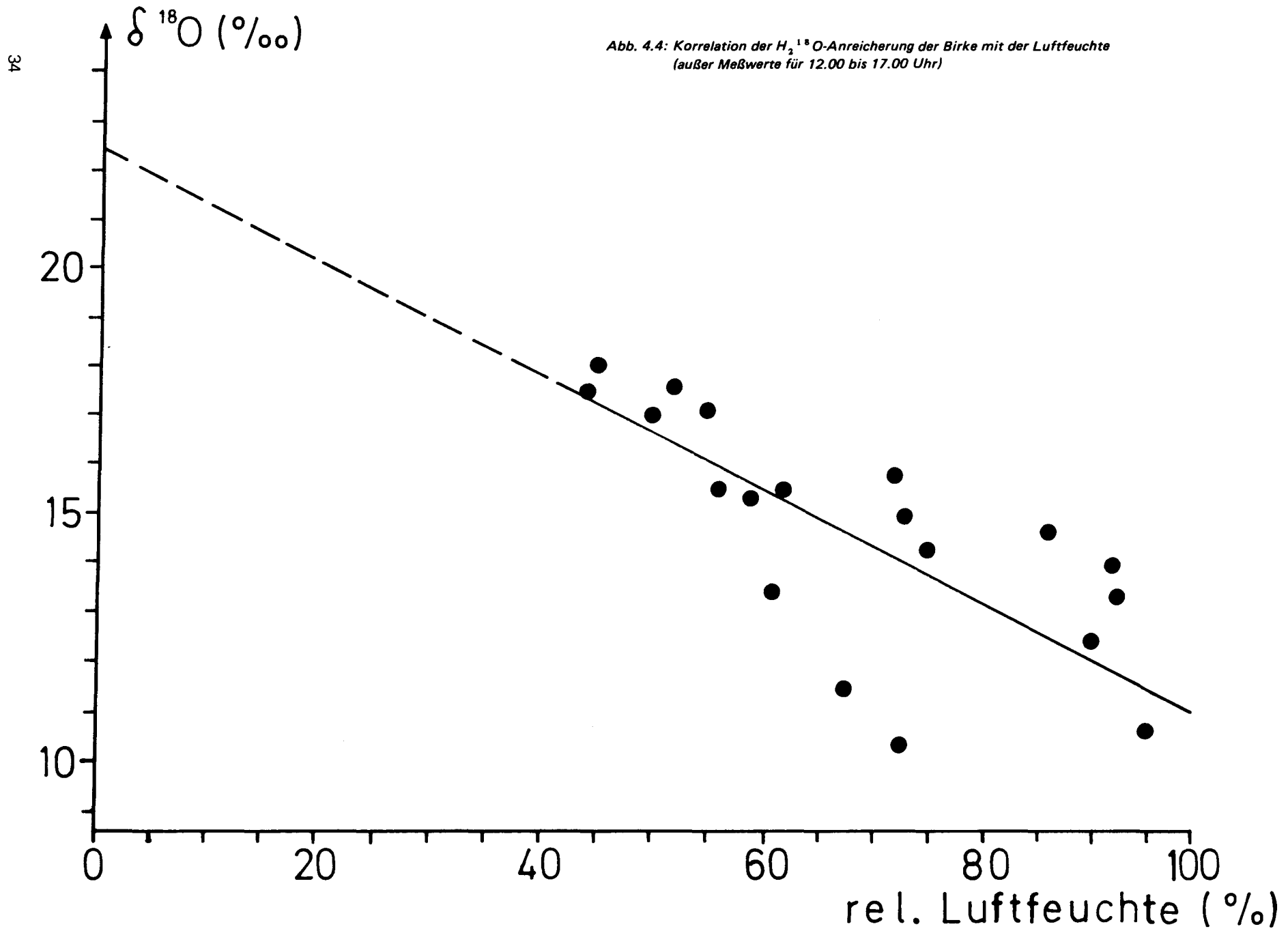
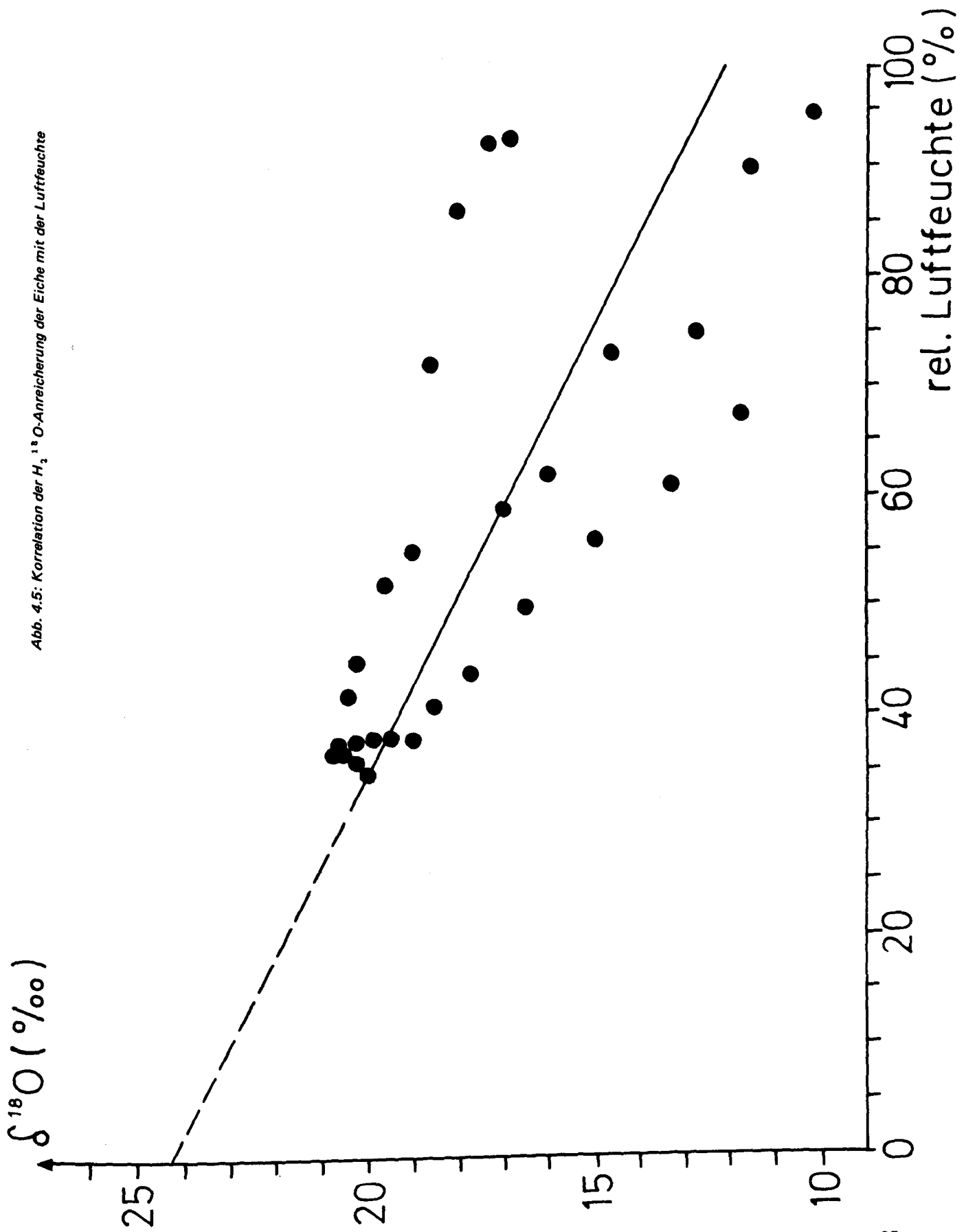


Abb. 4.5: Korrelation der $H_2^{18}O$ -Anreicherung der Eiche mit der Luftfeuchte



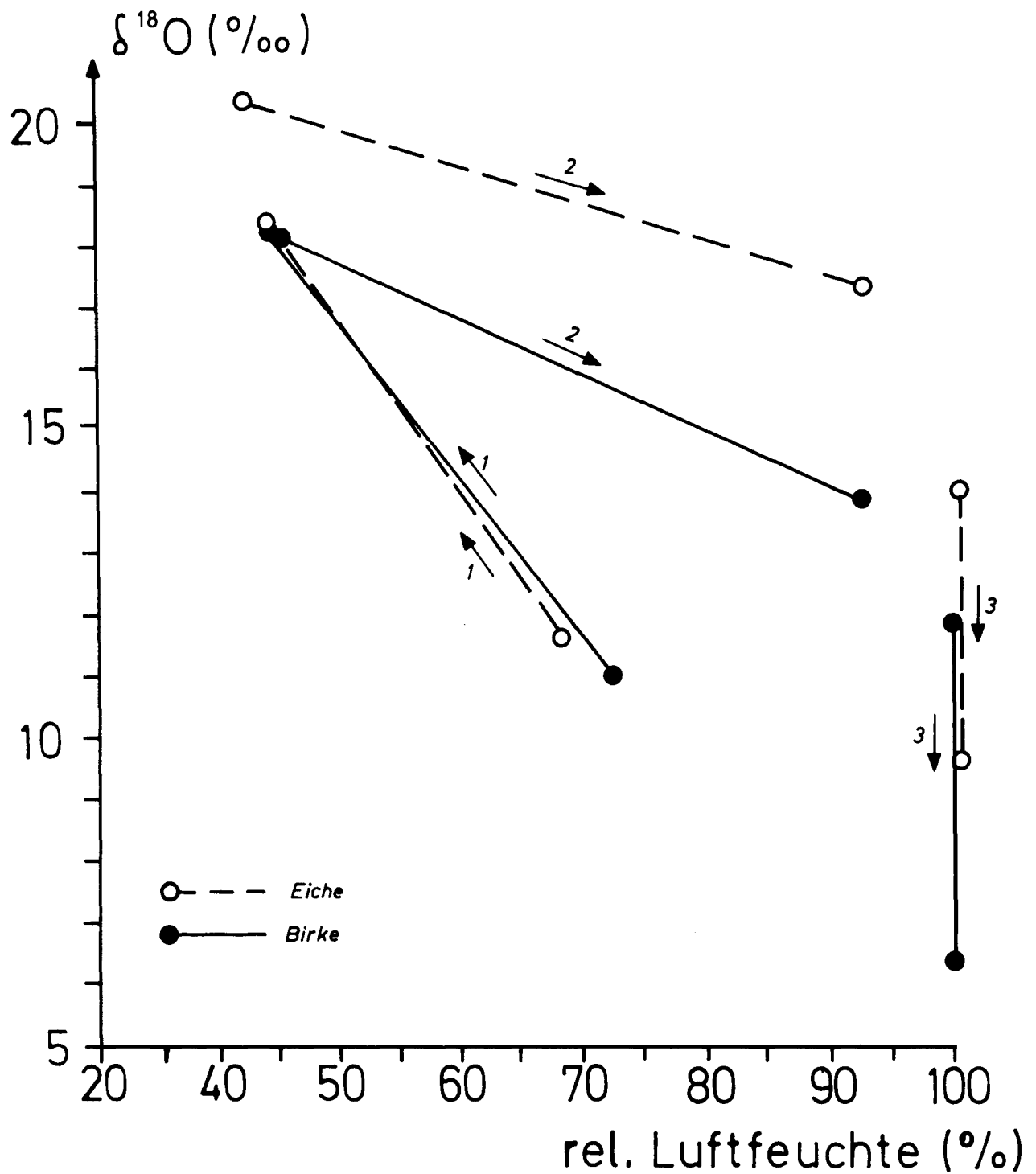


Abbildung 4.6: Korrelation der H_2^{18}O -Werte während der drei Phasen der An- bzw. Abreicherung mit der Luftfeuchte. Werte bezogen auf Astwasser.

Phase 1: 9.00 – 11.30

Phase 2: 17.00 – 20.30

Phase 3: 22.00 – 10.00

Die Auftragung in Abbildung 4.6 zeigt deutlich, daß unter Freilandverhältnissen keine einfache Korrelation zwischen relativer Luftfeuchte und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten besteht. Vielmehr kann man eine **Hysterese** beobachten.

Aus den Regressionsrechnungen ergibt sich Tabelle 4.4.

Tabelle 4.4

*Regressionsrechnungen für die Phasen 1 und 2.
Details siehe Tabelle 4.3.*

Phase	Uhrzeit	Baum	δ (‰)		δ (‰)
			$h = 0$	ϵ_K	$h = 1$
1	9.00–11.30	Birke	30	21	3
		Eiche	29	20	3
2	17.00–20.30	Birke	22	13	13
		Eiche	23	14	17

Es zeigt sich, daß die kinetischen Werte für den Anstieg recht hoch liegen (nach dem DONGMANN et al. 1974-Modell für $q = 2/3$). Die δ -Werte für $h=1$ liegen nahe 0. Der Abstieg zeigt niedrigere kinetische Effekte und höhere Gleichgewichtsanreicherungen. Neuere Messungen haben eine Konstanz von δ_L ergeben, so daß dessen Variation nicht dafür verantwortlich sein sollte. Der Abfall der Anreicherung ist derzeit noch eines der Probleme unserer Arbeiten. Hierbei nimmt die Transpirationsrate ab und damit die Geschwindigkeit der Einstellung stationärer Werte. Ob dies allein zur Deutung ausreicht, soll später untersucht werden.

Diese Arbeit hat gezeigt, daß eine dichtere Meßfolge der Probennahme eine differenziertere Interpretation der H_2^{18}O -Anreicherung im Blattwasser gestattet. Der Anstieg morgens ist rasch und stimmt mit den Modellbetrachtungen überein. Der Abfall ist langsamer und kann in zwei Abschnitte aufgeteilt werden: einen rascheren nachmittags und einen langsamen bei 100 % relativer Feuchte.

5. Literaturverzeichnis

- CRAIG, H. (1961)
Science **133**, 1833–1834
- DONGMANN, G. (1973)
Diss. TH Aachen
- DONGMANN, G., FÖRSTEL, H., WAGENER, K. (1972)
Nature New Biology **240**, 127–128
- DONGMANN, G., NÜRNBERG, H.W., FÖRSTEL, H., WAGENER, K. (1974)
J. Radiation and Environ. Biophys. **11**, 41–52
- GONFIANTINI, R., GRATZIU, S., TONGIORGI, E. (1965)
Use of Isotopes and Radiation in Soil-Plant
Nutrition Studies, IAEA Vienna, 405
- IAEA (1969)
IAEA Technical Report Series No. 96
- MERLIVAT, L., LESAIN, C., BRICOUT, J., FONTES, J.C., GAUTHERET, R.
(1974)
C.R. Acad. Sc. Paris **278**, 2925–2930
- NASAROW, N.M., KUTJURIN, W.M. (1970)
Fisiologia Rastonii **17**, 253–258
- SCHLESER, G., FÖRSTEL, H. (1974)
in press
- STASCHEWSKI, D. (1964)
Ber. Bunsenges. Phys. Chem. **68**, 454–459
- WAGENER, K. (1974)
Z. f. Naturf. **29a**, 245–250

6. Anhang

6.1 H₂¹⁸O-Meßwerte

Alle Angaben sind auf SMOW (CRAIG, 1961) bezogen.

Datum	Uhrzeit	Birke ($\delta \text{H}_2^{18}\text{O}^0/_{\text{OO}}$)	Eiche ($\delta \text{H}_2^{18}\text{O}^0/_{\text{OO}}$)	Datum	Uhrzeit	Birke ($\delta \text{H}_2^{18}\text{O}^0/_{\text{OO}}$)	Eiche ($\delta \text{H}_2^{18}\text{O}^0/_{\text{OO}}$)
6.9.	9.00	2.4	—	7.9.	0.30	2.6	4.2
	9.30	3.9	3.7		1.00	—	5.5
	10.00	5.3	4.4		1.30	2.4	5.2
	10.30	7.5	6.9		2.00	—	5.2
	11.00	9.7	8.4		2.30	1.2	3.6
	11.30	—	9.7		3.00	0.0	2.4
	12.00	—	11.4		3.30	1.1	6.4
	12.30	8.8	10.5		4.00	1.4	3.2
	13.00	7.9	10.9		4.30	—	1.2
	13.30	7.6	11.4		5.00	0.4	1.3
	14.00	9.2	12.4		5.30	0.4	4.0
	14.30	7.8	10.4		6.00	0.0	—
	15.00	7.1	—		6.30	0.3	4.1
	15.30	—	13.1		7.00	−0.1	4.8
	16.00	—	11.2		7.30	0.1	2.7
	16.30	9.8	—		8.00	−0.5	5.0
	17.00	—	12.0		8.30	−0.7	3.7
	17.30	10.2	—		9.00	—	3.3
	18.00	8.7	12.4		9.30	−0.7	0.4
	18.30	9.4	10.3		10.00	—	−0.7
	19.00	5.3	11.4		10.30	0.5	2.8
	19.30	8.7	6.4		11.00	—	1.9
	20.00	—	—		11.30	6.9	3.8
	20.30	4.8	—		12.00	5.3	6.3
	21.00	3.8	8.5		12.30	—	8.5
	21.30	8.3	9.5		13.00	8.0	6.0
	22.00	—	6.9		13.30	6.6	6.6
	22.30	—	—		14.00	6.1	9.7
	23.00	4.6	5.5		14.30	6.9	6.1
	23.30	3.5	5.8		15.00	—	10.9
	24.00	—	6.0				

6.2 Klimawerte

Die Werte für die relative Luftfeuchte und die Temperatur wurden am Bestandsrand gewonnen. Die Windgeschwindigkeit aus 30 m Höhe wurde von der Wetterstation der KFA zur Verfügung gestellt. Sie setzt sich als Stundenmittel aus 6 Einzelmessungen pro Stunde zusammen.

Datum	Uhrzeit	Temperatur (°C)	rel. Luftfeuchte (%)	Windgeschw. (m/sec)
6.9.	9.00	22.0	72.5	
	9.30	23.0	67.5	1.9
	10.00	24.3	61	
	10.30	26.2	56	2.0
	11.00	27.2	50	
	11.30	28.2	44	2.1
	12.00	30.0	41	
	12.30	31.0	38	2.7
	13.00	31.0	38	
	13.30	31.2	38	3.5
	14.00	31.2	35	
	14.30	31.0	36	4.4
	15.00	30.8	37.5	
	15.30	30.5	37	4.1
	16.00	29.9	37	
	16.30	29.2	37.5	4.6
	17.00	28.5	42	
	17.30	28.5	45	5.4
	18.00	26.1	52	
	18.30	25.0	55	4.6
	19.00	24.0	72	
	19.30	22.3	86	3.6
	20.00	21.1	92	
	20.30	20.7	95	3.4
	21.00	20.0	97	
	21.30	19.8	97.5	1.5
	22.00	18.5	100	
	22.30	18.2	100	1.8
	23.00	18.0	100	
	23.30	17.1	100	1.3
	24.00	16.7	100	

Datum	Uhrzeit	Temperatur (°C)	rel. Luftfeuchte (%)	Windgeschw. (m/sec)
7.9.	0.30	16.3	100	1.5
	1.00	16.0	100	
	1.30	16.0	100	1.6
	2.00	15.7	100	
	2.30	15.3	100	0.7
	3.00	15.0	100	
	3.30	14.5	100	1.1
	4.00	14.0	100	
	4.30	13.7	100	1.8
	5.00	14.2	100	
	5.30	15.0	100	0.7
	6.00	15.5	100	
	6.30	16.0	100	0.6
	7.00	16.0	100	
	7.30	16.0	100	0.3
	8.00	16.2	100	
	8.30	16.3	100	0.4
	9.00	16.3	100	
	9.30	16.4	100	0.9
	10.00	17.0	100	
	10.30	17.2	99	0.9
	11.00	18.1	95	
	11.30	19.8	90	1.1
	12.00	21.8	75	
	12.30	22.4	73	1.4
	13.00	23.6	62	
	13.30	24.0	59	1.9
	14.00	24.5	55	
	14.30	25.0	53	2.5
	15.00	25.0	52	

6.3 Daten des MICROMASS 602 C

Magnet:	13 kg Permanentmagnet für einen Massenbereich von 24 – 80
Magnetfeldstärke:	7,5 kG
Ablenkradius:	6 cm
Ablenkwinkel:	90°
minimale Probenmenge:	19 Torr · ml (CO ₂ eingefroren)
normaler Probenbereich:	0.76 – 15.2 Torr · l
Elektronenstrom:	20, 100, 200, 400 μ A
Elektronenenergie:	variabel von 0 – 80 V
Beschleunigungsspannung:	variabel von 0 – 5 KV
Kathode:	Thorium
Auflösungsvermögen:	$(\frac{M}{\Delta M})$: 300 bei einer Schlitzweite von 0.05 mm
Ionenquelle:	Nier – Typ
Einlaßsystem:	Doppel-Einlaßsystem für viskosen Gaseinlaß und Kältefinger zum Ausfrieren geringer CO ₂ -Mengen
Gas-Reservoir:	variabel von 8,5 – 65 ml
Partialdruckempfindlichkeit:	bei 5000 V und 200 μ A Elektronenstrom 10 ⁻⁴ A/Torr bei N ₂