

Klimaproxies aus einem Torfkern aus der Eifel

—

Ein kritischer Vergleich



Diplomarbeit im Fach Landschaftsökologie vorgelegt von Ingo Rehberger

Institut für Landschaftsökologie
Fachbereich Geowissenschaften
Westfälische Wilhelms-Universität Münster

Gutachter:
Herr Prof. Dr. Otto Klemm
Institut für Landschaftsökologie

Herr Prof. Dr. Harald Strauß
Geologisch-Paläontologisches Institut

Münster, Dezember 2008

I Inhaltsverzeichnis

I	INHALTSVERZEICHNIS.....	i
II	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	iii
III	TABELLENVERZEICHNIS	v
IV	ZUSAMMENFASSUNG	vii
V	ABSTRACT.....	viii
1	EINLEITUNG.....	1
	1.1 Zielsetzung	3
2	SPHAGNUM ALS MOOR- UND TORFBILDNER.....	4
3	ISOTOPENGEOCHEMISCHE GRUNDLAGEN.....	6
	3.1 Theoretische Grundlagen der Isotopengeochemie.....	6
	3.2 Die stabilen Isotope des Kohlenstoffes und Sauerstoffes	7
	3.3 Stabile Isotope des Kohlenstoffes und Sauerstoffes in Pflanzen	8
	3.3.1 Gefäßpflanzen.....	8
	3.3.2 <i>Sphagnum</i>	10
4	DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET.....	12
	4.1 Naturreumliche Einordnung	12
	4.2 Klima, Geologie, Böden	13
	4.3 Eigenschaften des Dürren Maares und Entstehungsgeschichte des Torfkörpers.....	13
5	DER KERN.....	16
	5.1 Probenahme	16
	5.2 Datierung	16
6	ANALYTISCHE METHODEN	17

6.1	Probenaufbereitung.....	17
6.2	Taxonomische Bestimmung der <i>Sphagnum</i>-Ästchen und Gefäßpflanzen und statistische Bewertung	17
6.3	Celluloseextraktion.....	18
6.4	Messung der Isotopenwerte der Cellulose	19
6.5	Statistische Datenanalyse	20
7	ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	21
7.1	Datierung des Profils und Torfwachstum	21
7.2	<i>Sphagnum</i>-Artenzusammensetzung des Profils und paläoökologische Bedeutung.....	23
7.3	Vergleich der Isotopenwerte der Fraktionen Stem, Branch und Bulk.....	25
7.3.1	$\delta^{13}\text{C}$-Werte.....	25
7.3.2	$\delta^{18}\text{O}$-Werte.....	29
7.4	Vergleich der Fraktionen <i>Eriophorum</i> spec. und <i>Vaccinium</i> (<i>subgenus oxycoccus</i>) mit Bulk und Stem	33
7.4.1	$\delta^{13}\text{C}$-Werte	33
7.4.2	$\delta^{18}\text{O}$ - Werte.....	36
7.5	Differenzen der Isotopenwerte aller Fraktionen	39
8	METHODENKRITIK.....	42
9	ABSCHLIEßENDE DISKUSSION UND AUSBLICK	43
10	LITERATUR	45
11	ANHANG.....	51

DANKSAGUNG

ERKLÄRUNG

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Moorfläche pro Staat in km ² . Die Abschätzungen basieren auf der Global Peatland Database der International Mire Conservation Group (IMCG) (verändert nach RYDIN UND JEGLUM 2008).....	2
Abbildung 2-1: Aufbau von <i>Sphagnum</i> . 1, 4 <i>Sphagnum Capillifolium</i> , 2, 3 <i>Sphagnum spec.</i> : 1. Habitus der Pflanze (0,4x) 2. Stämmchenstück mit abstehenden und hängenden Ästchen, Stämmchenblätter (1,5x) 3. Blattausschnitt mit großen Hyalocyten, Poren sowie schmalen Chlorocyten (180x) 4. Entblättertes Stämmchenstück mit Rindenzellen (Hyalocyten) (180x). (aA abstehender Ast, Ab Astblätter, C Chlorocyte, H Hyalocyte, hA hängender Ast, K Kapitulum, P Pore, S Stämmchen, Sb Stämmchenblätter) (verändert nach: 1 und 3 n. MÄGDEFRAU 1983, 2 und 4 n. DANIELS UND EDDY 1985).	4
Abbildung 3-1: Effekte, die den $\delta^{18}\text{O}$ -Wert des Niederschlagswassers durch geographische Breite, Höhe ü. NN und Saisonalität beeinflussen und Aufnahme- und Abgabeverhalten des Wassers von Gefäßpflanzen (verändert nach TREYDTE ET AL. 2004).....	10
Abbildung 4-1: Lage des Dürren Maares (verändert nach FORST ET AL. 1997).....	12
Abbildung 4-2: Luftbild des Untersuchungsgebietes mit Ort der Probenahme (verändert nach FORST ET AL. 1997)	14
Abbildung 7-2: Ergebnisse der AMS ^{14}C -Datierung des Profils aus dem Dürren Maar, dargestellt in einem Zeit-Tiefenmodell (dunkelblau \triangleq 1σ -Bereich und hellblau \triangleq 2σ -Bereich des kalibrierten Bereichs). Das Modell wurde erstellt mit Oxcal 4.0.5 (RAMSEY 2008).	22
Abbildung 7-2: Darstellung der erfassten <i>Sphagnum</i> -Artenzusammensetzung. Erläuterung der <i>Sphagnum</i> -Taxa siehe Legende.	23
Abbildung 7-3: Vergleich der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte (N = 35) der Fraktionen Branch (Kreise) und Stem (gefüllte Dreiecke) in %.	25
Abbildung 7-4: Vergleich der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte (N = 35) der Fraktion Bulk (gefüllte Quadrate) mit den Fraktionen Branch (Kreise) und Stem (gefüllte Dreiecke).....	26
Abbildung 7-5: Vergleich der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte (N = 35) der Fraktionen Branch (Kreise) und Stem (gefüllte Dreiecke) in %.	29

Abbildung 7-6: Vergleich der $\delta^{18}\text{O}$ - Werte (N = 35) der Fraktion Bulk (gefüllte Quadrate) mit den Fraktionen Branch (Kreise) und Stem (gefüllte Dreiecke).....	30
Abbildung 7-7: Vergleich der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte (N = 10) der Fraktion Vaccinium (leere Quadrate) mit den Fraktionen Bulk (gefüllte Quadrate) und Stem (gefüllte Dreiecke).	33
Abbildung 7-8: Vergleich der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte (N = 12) der Fraktion Eriophorum (Kreuze) mit den Fraktionen Bulk (gefüllte Quadrate) und Stem (gefüllte Dreiecke).	34
Abbildung 7-9: Vergleich der $\delta^{18}\text{O}$ - Werte (N = 10) der Fraktion Vaccinium (leere Quadrate) mit den Fraktionen Bulk (gefüllte Quadrate) und Stem (gefüllte Dreiecke).	36
Abbildung 7-10: Vergleich der $\delta^{18}\text{O}$ - Werte (N = 12) der Fraktion Eriophorum (Kreuze) mit den Fraktionen Bulk (gefüllte Quadrate) und Stem (gefüllte Dreiecke).	37
Abbildung 7-11: Differenzen der $\delta^{18}\text{O}$ – Werte der Fraktionen Bulk und Branch (N = 35).	39
Abbildung 7-12: Differenzen der $\delta^{18}\text{O}$ – Werte der Fraktionen Bulk und Eriophorum (N = 12).	40
Abbildung 7-13: Differenzen der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Fraktionen Branch und Stem (N = 35).	40

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Durchschnittliche relative Häufigkeiten (in %) der stabilen Isotope des Kohlenstoffes und Sauerstoffes (verändert nach RUNDEL ET AL. 1989)	7
Tabelle 6-1: Der Betrag des Korrelationskoeffizienten und die Interpretation in verbaler Form (aus BüHL 2006).	20
Tabelle 7-1: Ergebnisse der AMS $\delta^{14}\text{C}$ -Datierung. Die Kalibrierung erfolgte mit Oxcal 4.0.5 (RAMSEY, 2008).....	21
Tabelle 7-2: Deskriptive Parameter der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Fraktionen Bulk, Branch und Stem.....	27
Tabelle 7-3: Ergebnisse der Korrelationsanalyse nach Spearman.....	27
Tabelle 7-4: Deskriptive Parameter der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Fraktionen Bulk, Branch und Stem.....	30
Tabelle 7-5: Ergebnisse der Korrelationsanalyse nach Spearman.....	31
Tabelle 7-6: Deskriptive Parameter der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Fraktionen Vaccinium, Eriophorum, Bulk und Stem.	33
Tabelle 7-7: Ergebnisse der Korrelationsanalyse nach Spearman.....	35
Tabelle 7-8: Deskriptive Parameter der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Fraktionen Vaccinium, Eriophorum, Bulk, und Stem.	37
Tabelle 7-9: Ergebnisse der Korrelationsanalyse nach Spearman.....	38
Tabelle 11-1: Statistisch geschätzte Grenzen innerhalb derer der Anteil des Taxon an der Grundgesamtheit liegt. Der Abschätzung liegt die erfasste Ästchenanzahl zugrunde.	51
Tabelle 11-2: Ergebnisse der Bestimmung von 12 zufällig aus der Fraktion Branch ausgewählten <i>Sphagnum</i> -Ästchen.....	52
Tabelle 11-3: Ergebnisse der $\delta^{18}\text{O}$ -Messung. Angegeben in [%] gegen den Standard SMOW. Differenz der Messwerte in [%]	53
Tabelle 11-4: Ergebnisse der $\delta^{13}\text{C}$ -Messung. Angegeben in [%] gegen den Standard V-PDB. Differenz der Messwerte in [%]	54

Tabelle 11-5: Ergebnisse der $\delta^{13}\text{C}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Messung. Angegeben in [%] gegen den Standard V-PDB für $\delta^{13}\text{C}$ und SMOW für $\delta^{18}\text{O}$. Differenz der Messwerte in [%].....	55
Tabelle 11-6: Ergebnisse des Tests auf Normalverteilung. Ab einer Signifikanz > 0,05 wird NV angenommen.....	56
Tabelle 11-7: Ergebnisse des U-Rangtest nach Mann und Whitney zum Vergleich der Stichproben. Unterhalb einer Signifikanz von 0,05 wird ein Unterschied der Stichproben angenommen.	56
Tabelle 11-8: Ergebnisse des Rangkorrelationstests nach Spearman (Signifikanz unter einem Wert von 0,05)	57
Tabelle 11-9: Vergleich der Differenzen der $\delta^{13}\text{C}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenwerte. Test der Differenzen auf NV (ab einer Signifikanz > 0,05 wird NV angenommen) und Korrelation mit der Tiefe (signifikant unter einem Wert von 0,05). Betrachtet wurden die Kombinationen aus den Fraktionen, die einen signifikanten Unterschied im Median aufweisen.	57

IV Zusammenfassung

Das Dürre Maar ($50^{\circ}52'N$, $6^{\circ}53'O$, 455 m ü. NN) ist ein Trockenmaar im Vulkanfeld der Westeifel, Deutschland. Aus dem Torfkörper wurde im September 2006 ein Bohrkern von über 7 m Länge gezogen. Der Kern deckt ca. die vergangenen 3900 Jahre ab und wurde auf die $\delta^{13}C$ -Werte und $\delta^{18}O$ -Werte hin analysiert. Diese Analysen wurden durchgeführt an der Cellulose, die aus von Hand separierten Fraktionen des Torfmaterials extrahiert wurde. Die Fraktionen sind Bulkmaterial, *Sphagnum*-Ästchen und -Stämmchen, *Eriophorum spec.* und *Vaccinium (subgenus oxycoccus)* aus jeweils 2 cm mächtigen Abschnitten des Kerns.

Die $\delta^{13}C$ -Werte liegen für Bulk zwischen $-22,9\text{ ‰}$ und $-26,2\text{ ‰}$, für *Sphagnum* zwischen $-22,7\text{ ‰}$ und $-27,6\text{ ‰}$. Bei den Gefäßpflanzen tritt eine Variation von $-22,1\text{ ‰}$ bis $-26,6\text{ ‰}$ auf.

In den $\delta^{18}O$ -Werten ist eine Variation von $24,4\text{ ‰}$ bis $27,9\text{ ‰}$ für Bulk und $23,9\text{ ‰}$ bis $29,1\text{ ‰}$ der *Sphagnum*-Fraktionen zu beobachten. Für die Gefäßpflanzen liegt das beobachtete Minimum bei $26,9\text{ ‰}$ und das Maximum bei $28,9\text{ ‰}$.

Die Messungen offenbaren sowohl in den $\delta^{13}C$ -Werten als auch in den $\delta^{18}O$ -Werten einen Unterschied zwischen den *Sphagnum*-Ästchen und -Stämmchen. Dieser ist signifikant und durch den ganzen Kern beobachtbar wobei die Isotopenwerte höher in der Fraktion Branch sind. Der Medianunterschied beträgt $0,8\text{ ‰}$ für $\delta^{18}O$ und $1,1\text{ ‰}$ für $\delta^{13}C$. Die Isotopenwerte der drei Fraktionen Bulk, *Sphagnum*-Ästchen und -Stämmchen korrelieren signifikant mittel bis hoch miteinander.

Aufgrund signifikanter Unterschiede der Fraktion Bulk zu sowohl *Sphagnum*-Ästchen und -Stämmchen als auch zu *Vaccinium (subgenus oxycoccus)* und *Eriophorum spec.* muss eine Interpretation des Signals von Bulk Torfmaterial als Klimaproxy äußerst vorsichtig betrachtet werden. Veränderungen in der Artenzusammensetzung im Torfmaterial könnten fälschlicherweise als Unterschiede in Umweltbedingungen betrachtet werden.

Außerdem muss der Unterschied in den Isotopenwerten der *Sphagnum*-Pflanzenteile beachtet werden, wenn eine Untersuchung der ganzen *Sphagnum*-Pflanze erfolgt. Eine paläobotanische Untersuchung kann zur möglichen Interpretierbarkeit der Ergebnisse in einer Isotopenuntersuchung von Torfmaterial deutlich beitragen, da Pflanzen interspezifische Variabilität aufweisen.

V Abstract

The „Dürres Maar“ (50°52'N, 6°53`O, 455 m a. s. l.) is a dry maar in the West Eifel volcanic field, Germany. A core of over 7 m length was taken from the peat in September 2006. The core approximately covers the last 3900 years and has been analysed for $\delta^{13}\text{C}$ - and $\delta^{18}\text{O}$ -values. These analyses were applied to the cellulose extracted from manually separated fractions of the peat material. The fractions, each separated from 2 cm thick layers out of 35 depths of the core, are bulk material, *Sphagnum* branches and stems, *Eriophorum spec.* and *Vaccinium (subgenus oxycoccus)*.

The $\delta^{13}\text{C}$ -values lie in the range of - 22,9 ‰ and - 26,2 ‰ for the bulk material fraction, for *Sphagnum* between - 22,7 ‰ and - 27,6 ‰. In the vascular plants the variation is between - 22,1 ‰ and - 26,6 ‰.

In the observed $\delta^{18}\text{O}$ -values there is a variation of 24,4 ‰ to 27,9 ‰ in bulk, and 23,9 ‰ to 29,1 ‰ in the *Sphagnum* fractions. For the vascular plants the minimum is 26,9 ‰ and the maximum 28,9 ‰.

The measurements revealed an offset between the *Sphagnum* branches and stems for both the $\delta^{13}\text{C}$ - and $\delta^{18}\text{O}$ -values. This offset is significant and can be observed throughout the whole core, whereas the isotope values are higher in the branch fraction. The offset is expressed in a median difference of 0,8 ‰ for $\delta^{18}\text{O}$ und 1,1 ‰ for $\delta^{13}\text{C}$. The isotope values of the bulk, *Sphagnum* branches and stems fractions show a significant mid- to high-correlation.

Due to the significant offset between the bulk and *Sphagnum* branch and stem, as well as *Vaccinium (subgenus oxycoccus)* and *Eriophorum spec.* fractions, an interpretation of the isotope signal of bulk peat material as a climate proxy has to be examined with caution. Changes resulting from the species composition could be falsely interpreted as changes in environmental conditions.

In addition the offsets between the isotope values of the *Sphagnum* plant parts have to be considered when an analysis is carried out on whole-plant material. A palaeobotanical examination can add interpretability to the results obtained in every isotopic analysis of peat material, because the plants show inter-specific variability.

1 Einleitung

Der aktuelle Klimawandel wird auf vielen Ebenen diskutiert und seine Folgen haben erhebliche Auswirkungen auf Ökologie und Ökonomie. Es muss deshalb möglichst genau abgeschätzt werden, wie sich der Wandel vollzieht. Um einen genauen Überblick über die möglichen Auswirkungen des Klimawandels zu bekommen, wird versucht, frühere Klimaveränderungen besser zu verstehen und zu rekonstruieren. Dazu können Klimaproxies verwendet werden.

Ein Klimaproxy ist ein indirekter Anzeiger des Klimas, der in natürlichen Klimaarchiven aufgezeichnet wurde. Beispiele für solche Archive sind Baumjahresringe, See- oder Ozeansedimente oder Eiskerne. Klimaproxies werden zur Rekonstruktion des Klimas der Vergangenheit herangezogen, in der noch keine instrumentelle Aufzeichnung existierte. Ein wichtiger Klimaproxy für paläoklimatische Bedingungen sind Isotopenverhältnisse (UFZ 2008).

Um ein möglichst dichtes Netz von Daten zur Klimarekonstruktion aufzubauen, werden in verschiedenen Disziplinen Forschungen angestellt, um Klimaproxies zu kalibrieren.

Für das Holozän wird versucht, eine möglichst hohe zeitliche und räumliche Auflösung der Daten zu erreichen, da die nach der letzten Eiszeit entstandenen und immer noch erhaltenen Klimaarchive besonders zahlreich sind. Dabei tritt das Problem auf, dass man nicht in allen Teilen der Erde auf Rekonstruktionen aus Eis- oder Seesedimenten zurückgreifen kann. Auch der Einsatz der Dendrochronologie ist beschränkt, da das Baummaterial nur wenige tausend Jahre abdeckt.

Ein mögliches weiteres Klimaarchiv stellt somit die Untersuchung von Torfmooren dar. In Torfmooren werden Pflanzenreste konserviert durch die Wassersättigung und die - je nach Moortyp - sauren Verhältnisse, die im Moor vorherrschen können. Außerdem sind Torfmoore über weite Teile der Erde verteilt und stellen in einigen Regionen die einzige Vegetation dar, die an die vorherrschenden Konditionen angepasst ist.

Als Torfmoore eingestuft werden Flächen, die mit mindestens 30 cm Torf bedeckt sind. Die gesamte Fläche, die weltweit von Torfmooren bedeckt ist, beträgt $4,16 * 10^6 \text{ km}^2$ (s. Abbildung 1-1). Dies entspricht ca. 3 % der Ländfläche der Erde (RYDIN UND JEGLUM 2008). Davon sind etwa $1,5 * 10^6 \text{ km}^2$ von *Sphagnum* dominierte Flächen (RYDIN ET AL. 2006).

Torfmoore sind gut geeignet für paläoklimatologische Untersuchungen, da die toten Pflanzenreste nur sehr langsam bis kaum zersetzt und akkumuliert werden. Dadurch entsteht eine zeitliche Abfolge in Form einer Schichtung. Mittels Radiokarbon-

Datierungen kann somit eine Chronologie des Moorwachstums erstellt werden (MCCARROLL UND LOADER 2007).

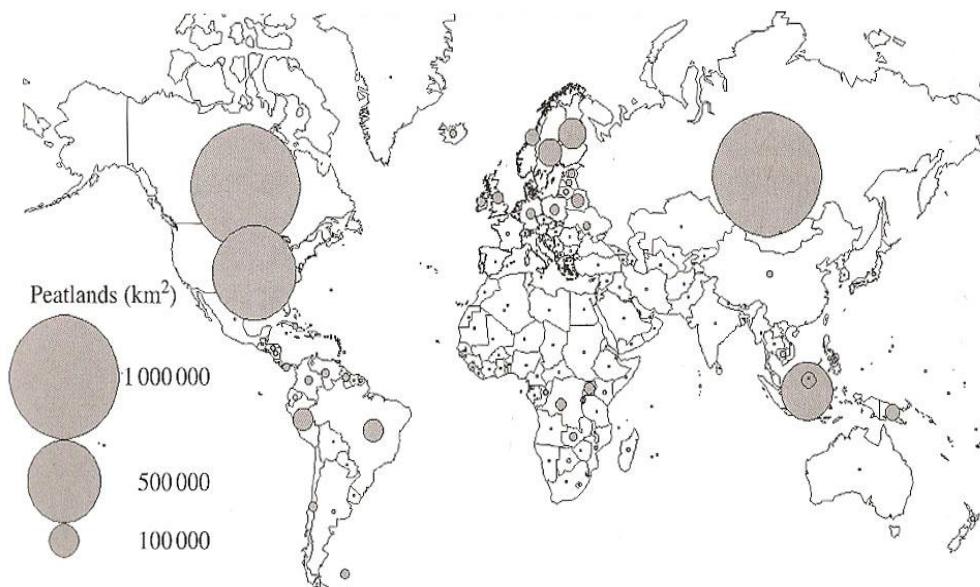


Abbildung 1-1: Moorfläche pro Staat in km². Die Abschätzungen basieren auf der Global Peatland Database der International Mire Conservation Group (IMCG) (verändert nach RYDIN UND JEGLUM 2008).

Das Torfmoos *Sphagnum* stellt in der Bildung der Torfmoore eine besondere Komponente dar. Die Torfmoore hätten ohne die besonderen Eigenschaften von *Sphagnum* weder ihre Ausdehnung noch ihre Eigenschaften.

Sphagnum-Moose säubern ihre Umgebung an und machen sie feucht und anoxisch. Sie brauchen und tolerieren nur niedrige Konzentrationen von Nährstoffen. Zudem sind sie relativ widerstandsfähig gegen Zersetzung (RYDIN UND JEGLUM 2008). Dadurch bleiben die *Sphagnum*-Moose und auch andere Pflanzen, die im Moor wachsen, in dem Torfmaterial erhalten.

Pflanzen aus Mooren als Klimaproxy lassen sich zum einen durch Analyse der vorkommenden Arten (Paläobotanik) und zum anderen durch die Analyse der Isotopenwerte der Pflanzen verwenden.

Die Cellulose von Pflanzen wird von klimatischen Faktoren beeinflusst. Beispielsweise nimmt das Wasser, welches die Pflanzen zur Photosynthese verwenden, Einfluss auf die Sauerstoffisotopenwerte der Cellulose. Der Sauerstoffisotopenwert des Wassers, welches letztlich zur Photosynthese verwendet wird, hängt wiederum von verschiedenen Umweltfaktoren ab, z.B. von der Temperatur. Aufgrund von Veränderungen der Aufnahme von CO₂ durch die Pflanze wird die Zusammensetzung der Kohlenstoffisotope der Cellulose beeinflusst. Eine erhöhte Temperatur, die mit einer erhöhten Evapotranspiration der Pflanze einhergeht, löst bei Gefäßpflanzen eine

Verengung der Stomata aus. Diese Verengung führt wiederum zu einer Verringerung der Aufnahme von CO₂ in die Pflanze und beeinflusst somit die Kohlenstoffisotopenverhältnisse der Cellulose (BRENNINKMEIJER ET AL. 1982, FARQUHAR ET AL. 1989, HONG ET AL. 2000, TREYDTE ET AL. 2004).

1.1 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist ein Vergleich von Klimaproxies, die aus einem Torfbohrkern gewonnen werden. Als Klimaproxies werden hier diejenigen Bestandteile des Torfes betrachtet, die bereits Gegenstand früherer Isotopenmessungen waren. Es handelt sich hierbei um Bulk des Torfmaterials, *Sphagnum*-Ästchen und -Stämmchen, *Vaccinium* (*subgenus oxycoccus*) und *Eriophorum* spec.. Die Gewinnung eines Signals erfolgt durch Messung der Isotopenwerte des Kohlenstoffes und des Sauerstoffes der aus den Pflanzen extrahierten Cellulose.

Die Verwendung der einzelnen Bestandteile als Klimaproxies soll durch einen Vergleich der einzelnen Signale kritisch betrachtet werden. Das Signal von *Sphagnum* wird dabei in zwei Pflanzenteile aufgeteilt, da in Kohlenstoffisotopenwerten im Median ein Unterschied zwischen diesen festgestellt wurde.

2 *Sphagnum* als Moor- und Torfbildner

Die Gattung *Sphagnum* (Torfmoose) ist in der Unterabteilung *Bryophytina* (Laubmoose) und der Klasse der *Sphagnopsida* mit der einzigen Familie *Sphagnaceae* die einzige Gattung. Sie weist einige Besonderheiten auf, die die Anpassung an die Standorte Moor und Sümpfe widerspiegeln. Die folgenden Ausführungen sind, wenn nicht anders gekennzeichnet, aus Veröffentlichungen von Jan-Peter Frahm zusammengefasst (FRAHM 2001, FRAHM 2006).

Torfmoose sind Hauptbildner von Mooren unterschiedlicher Ausprägung, insbesondere von Hochmooren. Die Pflanzen bestehen aus einem unverzweigten Stämmchen, das mit seitlichen Ästchen besetzt ist und in einer Endknospe (Kapitulum) endet (siehe Abbildung 2-1, 1 u. 2). Man unterscheidet zwischen herabhängenden und abstehenden Ästchen.

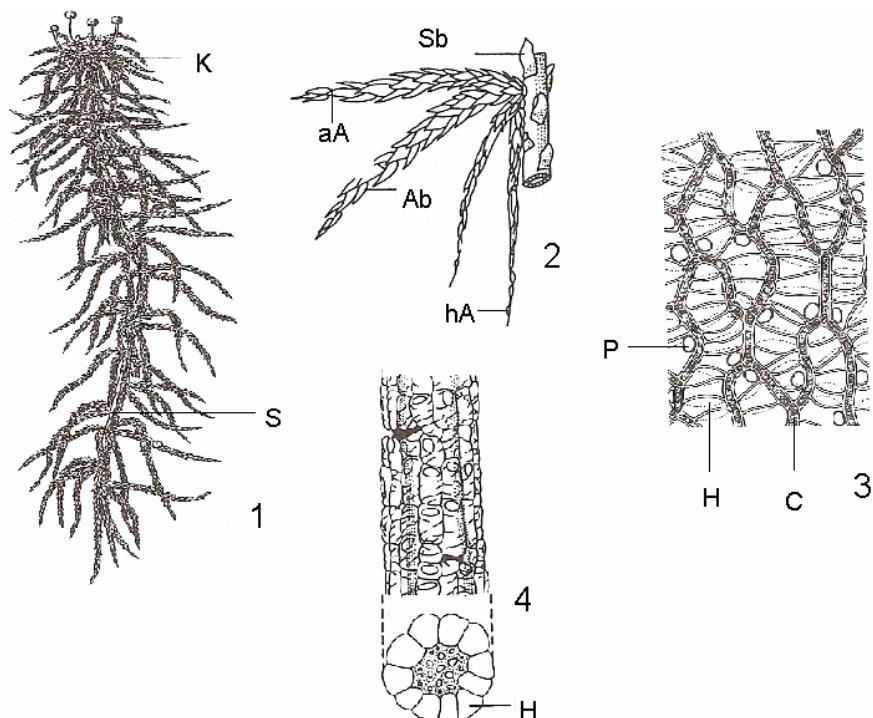


Abbildung 2-1: Aufbau von *Sphagnum*. 1, 4 *Sphagnum Capillifolium*, 2, 3 *Sphagnum spec.*: 1. Habitus der Pflanze (0,4x) 2. Stämmchenstück mit abstehenden und hängenden Ästchen, Stämmchenblätter (1,5x) 3. Blattausschnitt mit großen Hyalocyten, Poren sowie schmalen Chlorocyten (180x) 4. Entblättertes Stämmchenstück mit Rindenzellen (Hyalocyten) (180x). (aA abstehender Ast, Ab Astblätter, C Chlorocyte, H Hyalocyte, hA hängender Ast, K Kapitulum, P Pore, S Stämmchen, Sb Stämmchenblätter) (verändert nach: 1 und 3 n. MÄGDEFRAU 1983, 2 und 4 n. DANIELS UND EDDY 1985).

Torfmoose besitzen die Eigenschaft, an der Spitze weiter zu wachsen und am unteren Teil der Pflanze abzusterben. Die einzelne Pflanze kann hunderte oder tausende Jahre leben, wie RYDIN UND JEGLUM (2008) beschreiben. Durch diese Besonderheit des Wachstums wächst ein Hochmoor in die Höhe. Der absterbende Teil der Pflanze bleibt

im anstehenden Wasser zurück. Dieses wird durch die Nährstoffaufnahme der Torfmoose durch Kationenaustausch, der eine Abgabe von H⁺-Ionen der Pflanze in die Umgebung bedingt, angesäuert. Die besonders in Hochmooren extrem niedrigen pH-Werte gehen auf diese Besonderheit zurück. Aufgrund der Besonderheit im Wachstum und der Beeinflussung der Standortfaktoren wird die Zersetzung des sich bildenden Torfkörpers deutlich verlangsamt. Außerdem dienen die im folgenden beschriebenen Merkmale in der Anatomie der Sphagnen der Wasserspeicherung und Wasserstandsanhebung am Standort. Die Blätter der Sphagnen bestehen aus einer einzelligen Schicht, die sich in große, weitlumige, tote Hyalocyten und schmale, assimilierende Chlorocyten differenziert (siehe Abbildung 2-1, 3). Die Hyalocyten sind durch Poren geöffnet, durch die Wasser eintreten kann, wodurch Torfmoose das 25 - 30-fache ihres Trockengewichtes an Wasser speichern können. Auch die Rindenzellen an den Stämmchen sind Hyalocyten. In Verbindung mit den herabhängenden Ästchen und den am Stämmchen anliegenden Stammlättchen (siehe Abbildung 2-1: 2,4) bewirken sie eine dochartige, kapillare Wasserleitung. Die Torfmoose sind allesamt Säurezeiger, haben jedoch unterschiedliche Standortansprüche. Typische Hochmoorzeiger sind *Sphagnum magellanicum* (Sektion *Sphagnum*) und *Sphagnum capillifolium* var. *rubellum* sowie *S. fuscum* (je Sektion *Acutifolia*) (MAUQUOY und VAN GEEL 2007). *Sphagnum teres* (Sekt. *Squarrosum*) und *S. warnstofii* (Sekt. *Acutifolia*) sind typische Flachmoorzeiger.

3 Isotopengeochemische Grundlagen

3.1 Theoretische Grundlagen der Isotopengeochemie

Alle Atome eines Elements haben die gleiche Ordnungszahl. Atome der gleichen Ordnungszahl, die sich aber in ihrer Massenzahl unterscheiden, nennt man Isotope. Die Abweichungen in der Massenzahl werden durch die unterschiedliche Anzahl der Neutronen im Kern verursacht, während die Protonenzahl bei allen Isotopen eines Elementes konstant bleibt. Man unterscheidet stabile und instabile Isotope, wobei letztere radioaktiv zerfallen und somit auch für Datierungen genutzt werden können. Die stabilen Isotope haben sehr ähnliche, aber dennoch nicht gleiche physikalische Eigenschaften. Die meisten natürlichen Elemente bestehen aus Gemischen leichterer und schwererer Isotope, die in einem bestimmten Verhältnis vorliegen (siehe Kap. 3.2). Aufgrund ihrer verschiedenen Massen zeigen sie bei allen physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen geringfügige Verschiebungen in den Verhältniswerten in Edukt und Produkt (MOSER UND RAUERT 1980, MORTIMER 2003). Diese Prozesse nennt man Fraktionierungseffekte die in zwei Arten unterschieden werden:

Dies sind die kinetischen Isotopeneffekte und die Gleichgewichts-Isotopeneffekte, wobei kinetische Isotopeneffekte aufgrund der höheren Geschwindigkeit, geringerer Stabilität und niedrigeren Dissoziationsenergie der leichteren Isotope bspw. bei Diffusion, Evaporation und biologischen Abläufen auftreten. Die Gleichgewichts-Isotopeneffekte treten aufgrund der Auswirkung der unterschiedlichen Atommassen auf die Bindungsenergie in Gleichgewichtsreaktionen auf (SHARP 2007).

Dadurch kommt es in den beteiligten Kompartimenten der Stoffkreisläufe zu unterschiedlichen Isotopenverhältniswerten, es reichern sich schwerere oder leichtere Isotope an. Diese Verschiebungen in den Verhältniswerten können Umwelteinflüsse widerspiegeln und so zur Rekonstruktion dieser Einflüsse beitragen. Die Bestimmung der Isotopen-Werte erfolgt mit Hilfe der Massenspektrometrie und wird relativ zu einem internationalen Standard in der δ -Nomenklatur angegeben. Diese beschreibt die Abweichung des Häufigkeitsverhältnisses R (z.B. $R = ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ oder $R = ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$), also das Verhältnis der schwereren Isotope zu den leichteren Isotopen, zwischen einer Probe und einem internationalen Standard in [%]. Dieser Wert δ berechnet sich nach Gleichung 1:

$$\delta = [(R_{\text{Probe}} - R_{\text{Standard}}) / R_{\text{Standard}}] * 1000 [\%] \quad (\text{Gleichung 1})$$

Mit:

$$\delta = \text{Relatives Isotopenverhältnis in Promille}$$

R_{Probe} = Isotopenverhältnis der Probe

R_{Standard} = Isotopenverhältnis des Standards

Als Standard für die Kalibrierung der Kohlenstoffisotopenverhältniswerte wird „Vienna Pee Dee Belemnite“ (V-PDB), für die Sauerstoffisotopenanalytik wird der internationale Standard „Vienna standard mean ocean water“ (V-SMOW) verwendet. Die jeweiligen δ -Werte der Standards sind als 0 ‰ definiert (KENDALL AND CALDWELL 1998).

3.2 Die stabilen Isotope des Kohlenstoffs und Sauerstoffs

Die meisten Elemente besitzen zwei oder mehr stabile Isotope, wenngleich meist ein Isotop in überwiegend großer Menge vertreten ist. In Tabelle 3-1 sind die stabilen Isotope des Kohlenstoffs und Sauerstoffs und deren Anteil in % aufgelistet.

Tabelle 3-1: Durchschnittliche relative Häufigkeiten (in %) der stabilen Isotope des Kohlenstoffs und Sauerstoffs (verändert nach RUNDEL ET AL. 1989).

Element	Isotop	Anteil [%]
Kohlenstoff	^{12}C	98,89
	^{13}C	1,11
Sauerstoff	^{16}O	99,759
	^{17}O	0,037
	^{18}O	0,204

Der Isotopenverhältniswert für Kohlenstoff wird mit $\delta^{13}\text{C}$ abgekürzt und durch Bestimmung des Verhältnisses von ^{13}C zu ^{12}C berechnet. Der aktuelle $\delta^{13}\text{C}$ -Wert der Atmosphäre ($\delta^{13}\text{C}_{\text{atm}}$) liegt bei - 8 ‰ und wird negativer durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, deren $\delta^{13}\text{C}$ -Wert bei ca. - 25 ‰ liegt (SCHLESER 1995, FRIEDLI ET AL. 1986). Der $\delta^{13}\text{C}_{\text{atm}}$ -Wert fiel in den letzten 250 Jahren auf diese Größe, in den 4000 Jahren vorher lag er bei konstant ca. - 6,5 ‰ mit einer Variation von weniger als 0,3 ‰ (FRANCEY ET AL. 1999, TRUDINGER ET AL. 1999, INDERMÜHLE ET AL. 1999).

Es existieren drei stabile Isotope des Sauerstoffs: ^{16}O mit 99,759 %; ^{17}O mit 0,037 % und ^{18}O mit 0,204 %. Das Isotopenverhältnis der beiden häufigsten Sauerstoffisotope (^{18}O , ^{16}O) wird als $\delta^{18}\text{O}$ abgekürzt. Zum einen beruht dies auf der größeren relativen Menge des ^{18}O gegenüber dem ^{17}O und zum anderen darauf, dass das $^{18}\text{O}/^{17}\text{O}$ -Verhältnis aufgrund der geringeren Massenunterschiede konstanter ist (Rundel et al. 1989). Der Quellwert für Sauerstoff, der für diese Untersuchung wichtig ist, ist der des Niederschlags. Dieser lag für Mitteleuropa nach einer Rekonstruktion

aus dem Ammersee für den Untersuchungszeitraum, den die vorliegende Arbeit behandelt, in einem maximalen Schwankungsbereich von 1,5 ‰ (GRAFENSTEIN ET AL. 1998).

3.3 Stabile Isotope des Kohlenstoffes und Sauerstoffes in Pflanzen

Der Isotopenwert in den Bestandteilen der Pflanze wird durch den Wert der Quelle des jeweiligen Elementes und durch die auf diesen einwirkenden Prozesse der Fraktionierung bestimmt. Die Diskriminierung des schwereren Elementes führt zur Verschiebung der Isotopenverhältniswerte zwischen den einzelnen Kompartimenten (FARQUHAR ET AL. 1989).

3.3.1 Gefäßpflanzen

Der bestimmende Quellwert für Kohlenstoff im organischen Material der terrestrischen photosynthetisch aktiven Pflanzen ist der des Kohlenstoffdioxids (CO_2) der Atmosphäre, da über den Weg der Photosynthese das Kohlenstoffatom in die Cellulose eingebaut wird. Der Quellwert beträgt für den betrachteten Zeitraum -6,5 ‰ (s.o.). Die Gesamtmenge an ^{13}C im Verhältnis zu ^{12}C in pflanzlichem Material ist normalerweise geringer als im Kohlenstoffdioxid der Atmosphäre, was bedeutet, dass beim Einbau in pflanzliche Biomasse eine Fraktionierung der Kohlenstoffisotope geschieht (FARQUHAR ET AL. 1989, SCHLESER 1995). Das atmosphärische CO_2 gelangt über die Stomata in die Pflanze und muss dabei verschiedene Diffusionsbarrieren auf dem Weg in die Chloroplasten überwinden, bspw. die Diffusion durch die Grenzschicht zu den Stomata hin und durch die Stomata selber. Der Widerstand für $^{12}\text{CO}_2$ ist dabei geringer als für $^{13}\text{CO}_2$ und führt zu einer erhöhten Aufnahme von $^{12}\text{CO}_2$. Einen vergleichsweise großen Anteil an der Diskriminierung des ^{13}C gegenüber dem ^{12}C hat die C_3 -Fixierung mittels RuBisCO in der Photosynthese, wobei das ^{12}C bevorzugt eingebaut wird, also gegenüber ^{13}C diskriminiert wird. Je mehr CO_2 dabei in der Pflanze zur Verfügung steht, umso mehr wird ^{13}C diskriminiert (TREYDTE ET AL. 2004).

Rezentes organisches C_3 -Pflanzenmaterial weist einen durchschnittlichen $\delta^{13}\text{C}$ -Wert von -25 ‰ auf. Die Netto-Fraktionierung liegt bei C_3 -Pflanzen also bei -17 ‰ (SCHLESER 1995).

Die Öffnung der Stomata ist abhängig von den umgebenden Witterungsbedingungen. Ist es kühl und / oder feucht, sind die „Stomata aufgrund der hohen Luftfeuchte, die in den gemäßigten Breiten meist mit niedrigen Temperaturen korreliert, weit geöffnet“ (TREYDTE ET AL. 2004, S.224). Die interne CO_2 -Konzentration entspricht annähernd der

äußerer und die enzymatische Fraktionierung dominiert die Fraktionierung durch Diffusionswiderstände. Dieser Zustand führt zu niedrigen $\delta^{13}\text{C}$ -Werten (TREYDTE ET AL. 2004).

Ist es warm und / oder trocken, sind die Stomata weniger weit geöffnet oder sogar komplett geschlossen, um den Wasserverlust durch Transpiration zu verringern, was gleichzeitig zu einer geringeren Diffusion von CO_2 ins Blattinnere führt. Die interne CO_2 -Konzentration sinkt mit laufendem Metabolismus und die enzymatische Fraktionierung greift auf das gesamte intern verfügbare CO_2 zu, was die Fraktionierung durch Diffusion zum bestimmenden Faktor der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte werden lässt. Dieser Zustand führt zu hohen $\delta^{13}\text{C}$ -Werten (TREYDTE ET AL. 2004).

Die Sauerstoffisotopenzusammensetzung der Cellulose von Pflanzen im Allgemeinen hängt ab von drei Faktoren: (1) Der Isotopenzusammensetzung des Wassers, welches von der Pflanze aufgenommen wird, (2) der Anreicherung von schwereren Isotopen im Blattwasser aufgrund von Evapotranspiration, (3) der gesamten biochemischen Fraktionierung zwischen dem aufgenommenen Wasser und der Cellulose (BRENNINKMEIJER ET AL. 1982).

Der Quellwert für den Einbau des Sauerstoffes in die Cellulose der Gefäßpflanzen ist der des Wassers, das über die Wurzeln aufgenommen wird. Im Bereich des Moores entspricht dieses Wasser dem, welches als Niederschlag auf das Gebiet niedergeht (FORST ET AL. 1997).

Prozesse, die Unterschiede im Isotopenwert der Niederschläge verursachen, können vornehmlich von den Faktoren Temperatur und dem Anteil an ursprünglichem Verdunstungswasser, das sich im Luftpaket befindet und der Kondensation, und folglich dem Niederschlag, unterliegt, kontrolliert werden (KENDALL UND McDONNELL 1998).

Mehrere Effekte beeinflussen somit die Isotopenzusammensetzung des Niederschlags: Der Effekt der geographischen Breite (Breiteneffekt), der Höhe über dem Meeresspiegel (Höheneffekt) und die saisonale Variation durch Temperaturunterschiede (siehe Abbildung 3-1), zudem der Kontinentaleffekt, der durch die Entfernung zwischen Evaporation und Niederschlag erfolgt. Während des Transportes der feuchten Luftmasse erfolgt Tröpfchenbildung und Niederschlag. Dabei reichert sich das leichtere Element in der Luftmasse an, da die schweren Isotope eher in der flüssigen Phase bleiben (SHARP 2007) und abregnen. Weiterhin korrelieren niedrige $\delta^{18}\text{O}$ -Werte mit der Niederschlagsmenge, beschrieben als der so genannte Mengeneffekt (TREYDTE ET AL. 2004, FAß 2004). Der Isotopenwert bildet sich in der Cellulose ab. Der biologische Fraktionierungsfaktor photosynthetisch aktiver C_3 -

Pflanzen beträgt $27 \pm 3\text{‰}$. Weitere Fraktionierungsfaktoren, wie die Evaporation des Blattwassers hängen von der lokalen Luftfeuchte und Temperatur ab (MÉNOT-COMBES ET AL. 2002)

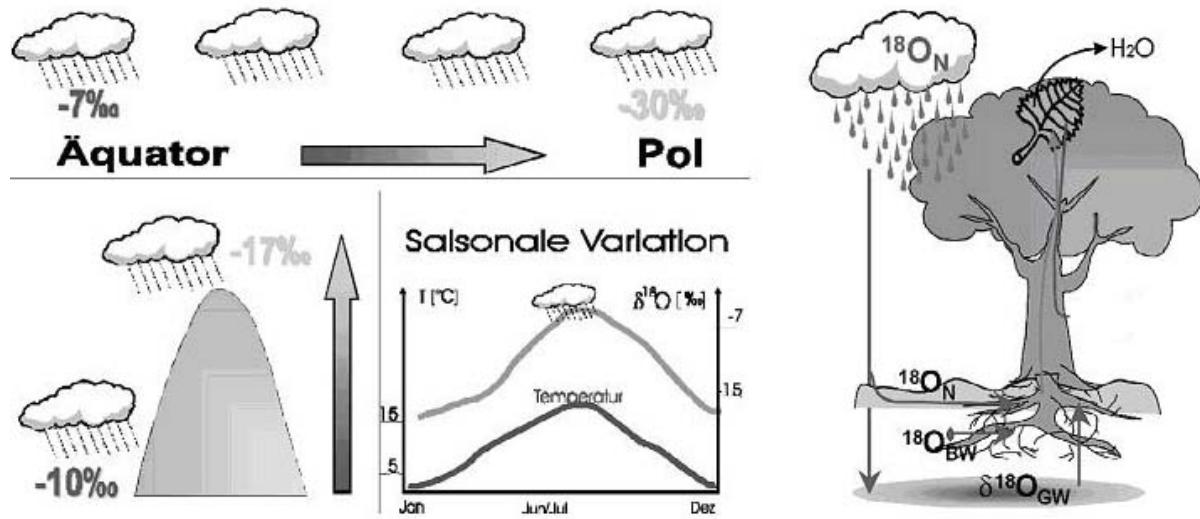


Abbildung 3-1: Effekte, die den $\delta^{18}\text{O}$ -Wert des Niederschlagswassers durch geographische Breite, Höhe ü. NN und Saisonalität beeinflussen und Aufnahme- und Abgabeverhalten des Wassers von Gefäßpflanzen (verändert nach TREYDTE ET AL. 2004).

3.3.2 *Sphagnum*

Da *Sphagnum* keine Stomata hat, kann es die Aufnahme von CO_2 nicht steuern. Das CO_2 muss auf dem Weg zu den photosynthetisch aktiven Zellen, den Chlorocyten, durch die Hyalocyten, die mehr oder weniger mit Wasser gefüllt sind. In die Hyalocyten gelangt das Kohlendioxid durch deren Poren. Die Diffusion durch Wasser bildet nun die Barriere für das CO_2 . Die Fraktionierung ist abhängig von der Dicke der die photosynthetisierenden Zellen umgebenden Wasserschicht. Die Assimulationsrate, die mit Lichtintensität und Temperatur zusammenhängt, nimmt geringeren Einfluss auf die Höhe der Fraktionierung je dicker die Wasserschicht ist und umgekehrt (WILLIAMS UND FLANAGAN 1996). Der Wassergehalt in der *Sphagnum*-Pflanze wird wegen der Unfähigkeit, den Wasserverlust zu regulieren, von äußeren Faktoren bestimmt. Der Widerstand gegenüber der Diffusion wird also höher, wenn feuchtere Bedingungen herrschen, und die zu erwartenden $\delta^{13}\text{C}$ -Werte wären weniger negativ. Andererseits führt eine Verringerung des Feuchtigkeitsgehaltes zu geringerem Diffusionswiderstand und so zu negativeren Werten (McCARROLL UND LOADER 2007). Diese Annahme wird gestützt durch niedrigere $\delta^{13}\text{C}$ -Werte für Pflanzen von trockenen Bulten im Vergleich zu denen in nassen Schlenken (PRICE ET AL 1997). PRICE ET AL (1997) merken

zudem an, dass Spezies mit Bulten als bevorzugten Standort besser geeignet sind für die Kohlenstoffisotopenanalyse. Aus Schlenken stammende, also temporär untergetaucht lebende Pflanzen nutzen das im Wasser gelöste CO₂ zur Photosynthese. Dieses stammt zu einem Teil aus zersetzer Biomasse und hat somit einen niedrigeren Isotopenverhältniswert als das atmosphärische CO₂, was relativ niedrigere Isotopenwerte der Cellulose der Pflanzen verursacht.

Die Fraktionierung der Sauerstoffisotope des Wassers in Sphagnen sollte derjenigen von höheren Pflanzen entsprechen, da der δ¹⁸O-Isotopenwert, wie bei den Gefäßpflanzen, vom δ¹⁸O-Wert des Wassers als Quellwert und der Anreicherung des schwereren Isotops durch Evaporation abhängig ist und die biologische Fraktionierung der von C₃-Pflanzen entspricht (McCARROLL UND LOADER 2007, MÉNOT-COMBES ET AL. 2002). Die Photosyntheserate wird bei niedrigem Wassergehalt der Pflanze beschränkt, da alle Stoffwechselprozesse reduziert werden. Dieses gilt auch bei sehr hohem Wassergehalt, da die Assimilation durch reduzierte CO₂-Diffusion begrenzt wird (WILLIAMS UND FLANAGAN 1996). Die Sauerstoffisotopenwerte der Cellulose von Sphagnen zeigen, dass untergetaucht lebende Arten die δ¹⁸O-Werte des Wassers wiedergeben. Andererseits bildet sich im δ¹⁸O-Wert von Arten, die trockenere Standorte vorziehen, der Einfluss der Evaporation ab (ZANAZZI UND MORA 2005).

4 Das Untersuchungsgebiet

4.1 Naturräumliche Einordnung

Das Dürre Maar ($50^{\circ}52'N$, $6^{\circ}53'E$, 455 m ü. NN) liegt in Rheinland-Pfalz zwischen den Orten Gillenfeld und Eckfeld im Landkreis Daun (siehe Abbildung 4-1). Es gehört zum Vulkanfeld der Westeifel im Westteil des Rheinischen Schiefergebirges (MERTES 1983). Naturräumlich ist es in die Einheit der Moseleifel einzuordnen. Diese Landschaft weist „flachwellige, scharfrandige, tiefzertalte, sanft nach Süden hin abfallende Hochflächen in 370 - 430 m Höhenlage, nur im Bereich der Rumpfflächen der Hocheifel bis auf 500 m ansteigend, mit Quarzhärtlingsrücken und Basaltkuppen sowie Eifelmaaren“ auf (ERDMANN UND PFEFFER 1997, S. 4). Geprägt wird dieser Teil der Eifel durch die Bäche und Flüsse, die von der Hocheifel kommen und der Mosel zustreben (EIFELVEREIN 1988), die rundlich ovalen Vertiefungen der Maare sowie die einzelnen Basaltkuppen der Vulkanberge, die auf die 400 m bis 500 m ü. NN liegende Hochfläche aufgesetzt sind (KEMPTER 1996).

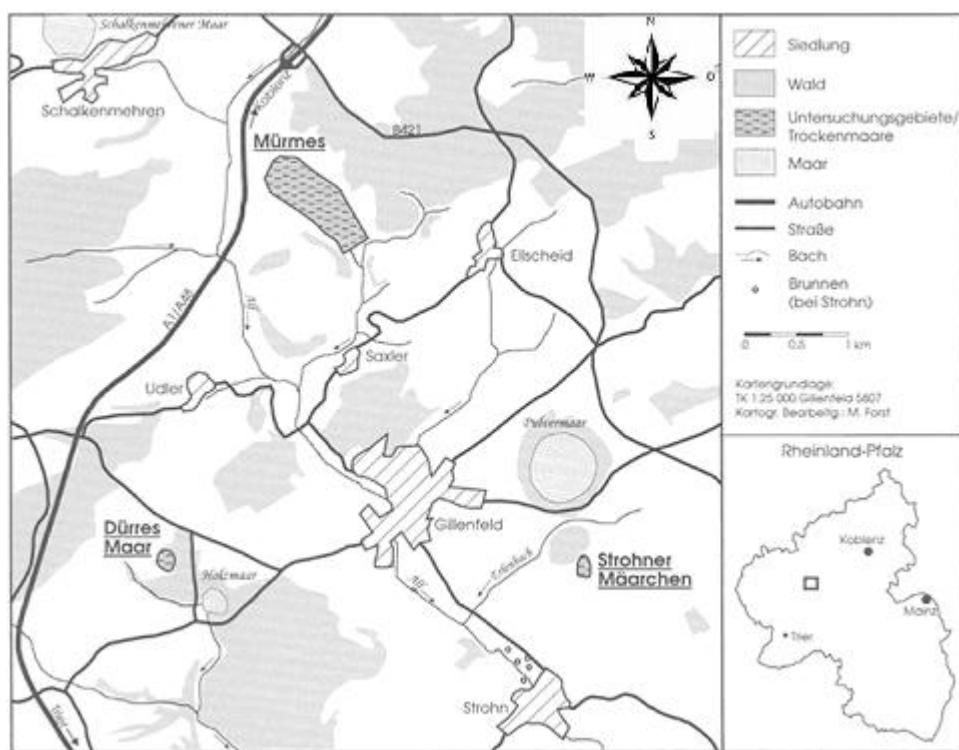


Abbildung 4-1: Lage des Dürren Maares (verändert nach FORST ET AL. 1997).

4.2 Klima, Geologie, Böden

Das Klima ist deutlich ozeanisch geprägt mit kühlen Sommern und milden Wintern mit einer Jahresmitteltemperatur an der Klimastation Manderscheid von 7,8 °C. Die Monatsmitteltemperatur im Januar beträgt -1 °C und im Juli 16 °C. Die mittlere Niederschlagssumme liegt bei 722 mm im Jahr an der Station Strohn-Wasserwerk, wobei die Niederschläge weitgehend gleichmäßig auf Sommer und Winter verteilt sind. Der subozeanische Charakter drückt sich vor allem im Winter aus, wenn südwestliche und westliche Luftströmungen einen feuchten und milden Witterungscharakter bedingen (FORST ET AL. 1997; KEMPTER 1996)

Das Westeifel-Vulkanfeld ist das einzige quartäre Vulkanfeld Deutschlands. Der Untergrund besteht aus gefalteten und zum Teil geschiefernden devonischen Sedimenten und diskordant auflagerndem Buntsandstein (MEYER 1994).

Die Geologie im Bereich des Dürren Maares wird bestimmt durch devonische Silt- und Sandsteine, die teilweise von vulkanischen Tuffen überlagert sind. Der Auswurf der Tuffe erfolgte nach Nordosten, wobei die Mächtigkeit der Tuffschichten von Süden nach Nordosten von 1,6 auf 6,8 m zunimmt. Im Westen und Norden ist das Moor von steil aufsteigenden Schieferhängen umgeben (FORST ET AL. 1997; MEYER 1994)

Als Bodentypen dominieren um das Dürre Maar Braunerden, an steileren Hängen können auch Ranker auftreten. Die vorherrschende Bodenart ist ein schluffig-sandiger Lehm geringer Lagerungsdichte mit stellenweise hohem Grusanteil aus Tonschiefer. (FORST ET AL. 1997)

4.3 Eigenschaften des Dürren Maares und Entstehungsgeschichte des Torfkörpers

Das Dürre Maar ist ein vermoortes Trockenmaar und hat einen Südost-Nordwest-Durchmesser von ca. 182 m und eine West-Ost-Breite von ca. 140 m (FORST ET AL. 1997). Der Torfkörper weist eine maximale Mächtigkeit von 12 m auf und setzt sich bis zu einer Tiefe von 10 - 11 m aus Sphagnumtorf mit wechselnden Gehalten an Cyperaceen bzw. *Eriophorum vaginatum*-Fasern zusammen. Erst darunter sind Cyperaceen-Torfe zu finden (FORST ET AL. 1997; KEMPTER 1996).

Er entstand laut HUMMEL (1949) während des Subboreals zum großen Teil infraaquatisch auf einem eutrophen See mit starker Muddebildung und Röhrichtbeständen und behält bis zur Gegenwart einen mesotrophen Einschlag. Jedoch mindestens in den oberen 6,85 m war die Versauerung dabei so stark, d.h. das Moor wurde so oligotroph, dass die entstehenden Torfe in ihren Elementgehalten

denen reiner Hochmoortorfe entsprechen, also die Entstehung in diesem Abschnitt ombrogenen Ursprungs ist (KEMPTER 1996).

Die Moorfläche von 1,9 ha weist verschiedene Bereiche auf. Das Moorinnere wird vom Randlagg, einem 5 - 20 m breiten, feuchten Gürtel eingefasst, der im Nordwesten teilweise in offene Wasserflächen übergeht (siehe Abb. 4-2). Der Randlagg ist deutlich oligotroph und artenärmer als der zentrale Teil. Im zentralen und nordwestlichen Bereich des Moorinnern befindet sich ein deutlich gebulteter Hochmoorbereich, in welchem auch die Probenahme (siehe Abb. 4-2) stattfand (FORST ET AL. 1997).

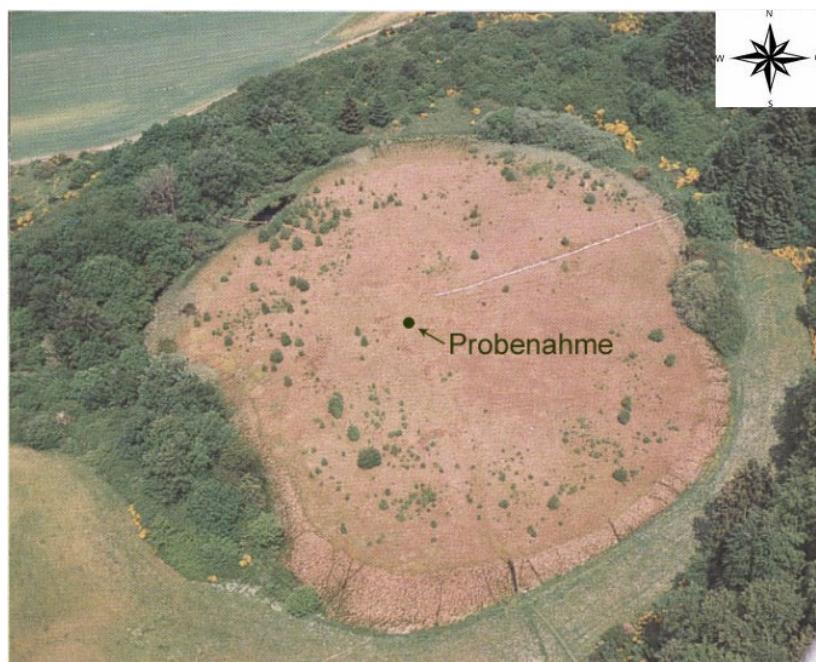


Abbildung 4-2: Luftbild des Untersuchungsgebietes mit Ort der Probenahme (verändert nach FORST ET AL. 1997)

Hochmoore können in der Oberfläche flach sein oder in der Mikrotopographie typische morphologische Formen zeigen, welche eine charakteristische Artzusammensetzung aufweisen. Diese Formen treten in Bulten-Schlenken-Komplexen auf (RYDIN UND JEGLUM 2008).

Bulten sind Erhebungen in der Mooroberfläche, die relativ zu den Schlenken, mit denen sie sich über die Fläche verteilt abwechseln, trocken sind und sich 20 - 50 cm über die niedrigste Oberflächenhöhe des Moores erheben. Die Schlenken hingegen sind feucht und variieren stark in ihrer Ausprägung. So gibt es Bereiche, die die meiste Zeit 5 - 20cm über dem anstehenden Wasserspiegel liegen und eine relativ feste Oberfläche mit dominierendem Graminoidbewuchs aufweisen, andererseits solche, die deutlich feuchter bis temporär überflutet sind und durch eine Dominanz der Bryophyten eine sehr weiche Oberfläche haben (RYDIN UND JEGLUM 2008).

Die folgenden Ausführungen zur Hydrologie des Dürren Maares finden sich in FORST ET AL. (1997). Die durchschnittlichen Grundwasserflurabstände im Moor betragen 15 - 25 cm. Diese werden durch den Niederschlag beeinflusst und sind auf die hohe Wasserhaltekapazität der Torfmoose zurückzuführen. Außerdem besteht im Dürren Maar die meiste Zeit des Jahres ein Wasserstandsgefälle von innen nach außen, was ein Eindringen der nährstoffreicherer Laggwässer verhindert. Nur im Bereich der beiden offenen Wasserflächen im Westen kann sich dieses Gefälle zeitweise ausgleichen oder umkehren, wobei dieser Beitrag zur oberflächennahen Wasserversorgung gering zu sein scheint. Außer im Falle von hydrologischen Extremereignissen (einmalig beobachtetes Ereignis von 60 mm Niederschlag in 48 h bei gefrorenem Boden am 12.01.1993) konnte kein Zufluss von außen erfasst werden. Der eigentliche Grundwasserspiegel liegt bei ca. 6 m Tiefe. Dieser ist für jahreszeitlich auftretende Schwankungen der Mooroberfläche verantwortlich, wobei Teile der Mooroberfläche absinken und andere aufsteigen können. Nach starken Niederschlägen kann es außerdem zu einer sprunghaften Anhebung der gesamten Mooroberfläche um mehrere Dezimeter in Zeiträumen von weniger als zwei Wochen kommen.

5 Der Kern

5.1 Probenahme

Der Kern wurde am 14. September 2006 gewonnen, indem zwei unterschiedliche Bohrmethoden Anwendung fanden. Für die oberen 3 m wurde ein Torfstecher und für die weiteren 4,50 m ein Kammerbohrer verwendet, der sich schließen lässt, um einen Kernverlust zu verhindern. Der obere Teil wurde in Abschnitten von 1 m Länge und 6 cm Durchmesser, der untere Teil in 50 cm langen Stücken und einem Durchmesser von 5,5 cm genommen. Die einzelnen Abschnitte wurden in Hälften eines Plastikrohres des entsprechenden Durchmessers gepackt, mit Alufolie abgedeckt und in Polyurethan-Tüten horizontal in Transportkisten gelagert. Der Bohrer wurde vor jedem Bohrvorgang mit deionisiertem Wasser gereinigt.

Die weitere Beprobung erfolgte am Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (INRES) der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, wo die Abschnitte zunächst bei - 24 °C eingefroren und gelagert wurden. Diese wurden in gefrorenem Zustand mit einer Stahl-Handsäge in Abschnitte von 2 cm Dicke geschnitten. Wenn im weiteren Verlauf der Arbeit bei der Tiefe nur eine einzelne cm – Angabe gemacht wird, stellt dies die Tiefenangabe der Mitte der Probe dar. Das Blatt der Säge verursachte jeweils ein Verlust von 5 % jeder Scheibe. Daraufhin wurden die äußeren 2 mm jeder Scheibe entfernt und dann vorsichtig mit deionisiertem Wasser gewaschen, um eventuelle Kontaminierungen mit nicht der entsprechenden Tiefe entspringendem Material zu entfernen (GIVELET ET AL. 2004). Die weitere Lagerung erfolgte bei - 18 °C im Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre (ICG-V) im Forschungszentrum Jülich.

5.2 Datierung

Insgesamt wurden 14 Abschnitte (13 mal 2 cm und einmal 4 cm), über den ganzen Kern verteilt, ausgewählt und im Poznań Radiocarbon Laboratory, Polen einer AMS ^{14}C -Datierung unterzogen. Das verwendete Material war reines *Sphagnum*. Für die Tiefe 5,76 - 5,80 m, den einzigen 4 cm Abschnitt, wurde *Vaccinium spec.* für die ^{14}C -Datierung verwendet, da zu wenig *Sphagnum*-Material enthalten war. Die genaue Aufbereitung der Proben zur ^{14}C -Datierung findet sich in CZERNIK UND GOSLAR (2001).

Die Kalibrierung der ^{14}C -Rohdaten und Erstellung eines Zeit-Tiefen-Modells erfolgte mit dem Programm Oxcal 4.0.5 (RAMSEY, 2008).

6 Analytische Methoden

6.1 Probenaufbereitung

Es wurden 5-6 g Torf-Material aufgetaut und in einem 800 ml Becherglas in deionisiertem Wasser auf einem Magnetrührer bei 85 °C für eine Stunde gerührt. Daraufhin wurde die Probe über einem 200 µm Sieb mit ca. 4 Litern deionisiertem Wasser gesiebt. Die verbleibende > 200 µm - Fraktion wurde in ein 50 ml Zentrifugenrörchen gegeben und im Kühlschrank aufbewahrt. Durch das Erhitzen und gleichzeitige Rühren wurden die Proben aus dem Zustand des zusammenhängenden Torfstückes in die einzelnen pflanzlichen Bestandteile zerlegt. Diese > 200 µm Größenfraktion enthält sowohl *Sphagnum*-Ästchen und -Stämmchen als auch Pflanzenteile von Cyperaceen (*Eriophorum spec.*) und *Vaccinium* (*subgenus oxycoccus*). Die unterschiedlichen Pflanzenteile wurden unter einem Zoom-Stereomikroskop Nikon SMZ 2B von Hand mit Pinzette voneinander separiert und in Mikrofläschchen in deionisiertem Wasser gelagert. Es wurden die vier Fraktionen *Sphagnum*-Ästchen, *Sphagnum*-Stämmchen, *Eriophorum* spec. und *Vaccinium* (*subgenus oxycoccus*) separiert. Für die *Sphagnum*-Fraktionen musste ein Mindestgewicht von 10 mg erreicht werden, was ca. 350 - 400 Ästchen und 100 - 150 Stämmchen entspricht, um genug Cellulose zu gewinnen. Im Weiteren werden die Fraktionen jeweils folgendermaßen bezeichnet: Stem (*Sphagnum*-Stämmchen); Branch (*Sphagnum*-Ästchen); Bulk (gesamtes Torfmaterial); Vaccinium (*Vaccinium subgenus oxycoccus*); Eriophorum (*Eriophorum spec.*).

6.2 Taxonomische Bestimmung der *Sphagnum*-Ästchen und Gefäßpflanzen und statistische Bewertung

Bisherige Studien der Isotopensignale an Sphagnen zeigten deren interspezifisch unterschiedliche Reaktionen auf Umwelteinflüsse sowohl für stabile Kohlenstoff- als auch für Sauerstoffisotope (MÉNOT UND BURNS 2001, MÉNOT-COMBES ET AL. 2002).

Die fossilen *Sphagnum*-Pflanzenteile lassen jedoch eine Bestimmung bis auf die Art hin größtenteils aufgrund der Trennung von Ästchen und Stämmchen und fehlender Stammlättchen nicht zu. Deshalb wurde eine Determination der Sphagnen anhand von Blattmerkmalen der Hyalinzellen der Ästchen (BARBER 1981, MAUQUOY UND VAN GEEL 2007) durchgeführt, die die Artenzusammensetzung der untersuchten Abschnitte wiedergeben soll. Dabei tritt die Schwierigkeit auf, dass Sphagnumteile der Untergattung *Litophloea*, welche die Sektion *Acutifolia* und *Cuspidata* beinhalten, nur

bis auf die Sektion bestimmt werden können. Nur Sphagnen der Untergattung *Inophlea* (Sektion *Cymbifolia*) konnten bis zur Art hin determiniert werden (DUPONT 1986). Die Bestimmung der Sphagnen erfolgte mithilfe eines Leica MZ 12.5 Stereomikroskop und wurde an 12 zufällig ausgewählten Ästchen aus der bereits separierten Probe durchgeführt. Hieraus wurde ein Konfidenzintervall nach Clopper-Pearson bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha \leq 0,05$ berechnet, welches eine Abschätzung der Häufigkeitsanteile zulässt (LIENERT 1978). Es wurde die Nomenklatur und Taxonomie von SMITH (2004) angewendet. *Eriophorum* spec. und *Vaccinium* (*subgenus oxycoccus*) wurden unter einem Zoom-Stereomikroskop Nikon SMZ 2B auf Grundlage von MAUQUOY UND VAN GEEL (2007) bestimmt und taxonomisch klassifiziert.

6.3 Celluloseextraktion

Die Cellulose wurde mithilfe von Kupferammoniumhydroxid-Lösung (CUAM) extrahiert. CUAM-Lösung („Schweizer Reagenz“) löst nur die Cellulose aus dem Grundmaterial (SAALWÄCHTER ET AL. 2000). Die Gewinnung der in Lösung gegangenen Cellulose durch Wiederausfällung hat den Vorteil, dass ein sehr homogenes und nicht durch mineralische Komponenten verunreinigtes Ergebnis produziert wird (WISSEL ET AL. 2008).

Das Probenmaterial wurde gefriergetrocknet und dann 10 h mit 50 ml einer 7 % NaClO₂ Lösung bei 60 °C in einem Zentrifugenröhrchen gebleicht und daraufhin über einem 20 µm Sieb mit einem Liter deionisiertem Wasser gewaschen. Dann erfolgte wieder eine Gefriertrocknung, der sich die Behandlung mit der CUAM-Lösung ($[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4](\text{OH})_2$) mit 20 g $[\text{Cu}(\text{OH})_2]$ / l in 25 %-iger Ammoniaklösung anschloss. Die Probe wurde hierfür 6 h gerührt, 10 Stunden stehen gelassen, und danach über ein 20 µm Sieb gegeben. Das Filtrat wiederum wurde in ein 50 ml Zentrifugenröhrchen mit 3 ml 20 %-iger H₂SO₄ gegeben und mit deionisiertem Wasser aufgefüllt. Die Ausfällung der Cellulose konnte nun im stehenden Zentrifugenröhrchen 20 Minuten ablaufen, woraufhin die Probe zentrifugiert und die sich danach am Boden des Zentrifugenröhrchens befindliche Cellulose nochmals mit 20 % H₂SO₄ behandelt wurde. Die Probe wurde nun weitere 3 - 4 Mal zentrifugiert um einen neutralen pH-Wert zu erreichen. Vor allen Zentrifugationen wurde das Zentrifugenröhrchen jeweils komplett mit deionisiertem Wasser aufgefüllt und dieses nach dem Zentrifugieren wieder abdekantiert. Die erhaltene Cellulose wurde anschließend gefriergetrocknet.

Die Cellulose des Bulk-Material wurde nach der Methode extrahiert, die in MENOT-COMBES ET AL. 2002 für Moose angewendet wurde. Hierbei wird die Cellulose nicht in

Lösung gebracht, sondern es werden chemisch die anderen Pflanzenbestandteile extrahiert. Die so erhaltene Cellulose wurde gefriergetrocknet.

6.4 Messung der Isotopenwerte der Cellulose

Für die Bestimmung der C-Isotope wurden 200 - 300 µg der Cellulose in Zinnkapseln eingewogen. In der Online-Verbrennung in einem EuroEA Elementaranalysator (Euro Vector Instruments) bei einer Temperatur von 1080 °C unter Zuführung von Sauerstoff wurden sie nun verbrannt und das dabei entstehende Gasgemisch über ein Heliumträgergasstrom durch ein mit Kupferspänen gefülltes Rohr geleitet. Dadurch wird NO_x zu N₂ reduziert. In einer Magnesiumperchloratfalle wird das H₂O entfernt und dann in einer chromatographischen Trennsäule das CO₂ und N₂ getrennt und im IsoPrime continuous flow isotope ratio Massenspektrometer (GV Instruments) das CO₂ vermessen.

Für die Isotopenmessungen des Sauerstoffes wurden 275 ± 10 µg Cellulose in Silberkapseln eingewogen und vor der Messung über Nacht bei 100 °C in einem Vakuum-Trockenschrank getrocknet, um an die Cellulose angelagertes Wasser zu entfernen. Die Silberkapsel wird dann online in einem Hochtemperaturanalysator (HT-O, HEKAtch) bei 1445 °C pyrolysiert, wobei Kohlenstoffmonoxid entsteht. Dabei entstehendes CO₂ wird an zusätzlichem Kohlenstoff im Leitungsrohr vorbeigeführt und hierbei zu CO reduziert. In einer chromatographischen Trennsäule wird das CO vom Wasserstoff getrennt und dann im IsoPrime continuous flow isotope ratio Massenspektrometer (GV Instruments) vermessen.

Für δ¹³C-Werte wurde eine einfache Messung vorgenommen, für die δ¹⁸O-Werte wurden 2-3 Messungen durchgeführt und ein Mittelwert gebildet. Um eine Bestimmung der Standardabweichung der δ¹³C-Werte durchzuführen wurden einige Proben doppelt vermessen und der Mittelwert dieser zur weiteren Analyse verwendet.

Als Referenzmaterialien wurden zur Kalibrierung USGS24 und IAEA-C3 verwendet, die von der „International Atomic Energy Agency“ (IAEA) zertifiziert sind. Fluka α-cellulose und G-IV Graphit wurden als institutsinterne zusätzliche Kontrollstandards eingesetzt. Die Messgenauigkeit liegt für δ¹³C bei ≤ 0,1 ‰ und δ¹⁸O bei ≤ 0,3 ‰.

6.5 Statistische Datenanalyse

Die ermittelten Daten wurden mittels des Shapiro-Wilk Tests auf Normalverteilung untersucht. Das Signifikanzniveau betrug dabei 95 % (BÜHL 2006).

Da in den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten von Branch und Stem keine Normalverteilung angenommen werden kann (s. Tabelle 8-6, Anhang), wurden im weiteren Verlauf der Analyse parameterfreie Tests verwendet.

Zum Vergleich der Häufigkeitsverteilungen jeweils zweier Stichproben wurde der verteilungsfreie U-Rangtest nach Mann und Whitney verwendet, bei dem primär der Medianunterschied getestet wird (SCHÖNWIESE 2006).

Weiterhin wurde die zweidimensionale Rangkorrelationsanalyse nach Spearman durchgeführt. Der Korrelationskoeffizient drückt hierbei die Stärke des Zusammenhangs aus, eine Aussage über eine Kausalität lässt sich nicht treffen (SCHÖNWIESE 2006). In Tabelle 6-1 ist die im Folgenden verwendete Interpretation der Stärke der Korrelation zusammengefasst.

Tabelle 6-1: Der Betrag des Korrelationskoeffizienten und die Interpretation in verbaler Form (aus BÜHL 2006).

Wert	Interpretation
0 - 0,2	sehr geringe Korrelation
0,2 - 0,5	geringe Korrelation
0,5 - 0,7	mittlere Korrelation
0,7 - 0,9	hohe Korrelation
0,9 - 1	sehr hohe Korrelation

Das Niveau der Signifikanz der Ergebnisse der statistischen Tests wird über die Irrtumswahrscheinlichkeit α beschrieben. Wenn $\alpha \leq 0,05$ ist wird das Ergebnis als signifikant betrachtet, wenn $\alpha \leq 0,01$ wird von einem hoch signifikanten Ergebnis gesprochen.

Die deskriptive Statistik wurde mit Microsoft Excel berechnet. Die Durchführung der statistischen Tests erfolgte mit SPSS 14.0.

7 Ergebnisse und Diskussion

7.1 Datierung des Profils und Torfwachstum

Die Ergebnisse der Datierung sind in Tabelle 7-1 zusammengefasst. Das Material der Tiefe 20-22 cm weist einen pMC-Wert (percent modern carbon) von über 100 auf. Werte über 100 im pMC sind nur in der sogenannten „post-bomb period“ zu finden (GOSLAR ET AL. 2005). Das Material wurde also nach 1953 gebildet. Die anderen Proben konnten zur Altersbestimmung verwendet werden.

Tabelle 7-1: Ergebnisse der AMS ^{14}C -Datierung. Die Kalibrierung erfolgte mit Oxcal 4.0.5 (RAMSEY, 2008).

Tiefe [cm]	Unkalibrierte ^{14}C Daten [BP]	Kalibrierte ^{14}C Daten [BP]	Kalibrierte ^{14}C Daten [BC / AD]
20–22	130.3 ± 0.39 pMC		
68–70	285 ± 30 BP	457 – 347	1548 ± 55 AD
132–134	890 ± 30 BP	834 – 733	1167 ± 51 AD
172–174	1075 ± 30 BP	1015 – 930	978 ± 43 AD
228–230	1140 ± 30 BP	1142 – 968	895 ± 87 AD
308–310	1270 ± 30 BP	1286 – 1167	724 ± 60 AD
380–382	1490 ± 30 BP	1416 – 1305	590 ± 56 AD
428–430	1570 ± 30 BP	1530 – 1393	489 ± 69 AD
460–462	1585 ± 30 BP	1538 – 1405	479 ± 67 AD
516–518	1650 ± 30 BP	1622 – 1508	385 ± 57 AD
576–580	2125 ± 35 BP	2160 – 1997	129 ± 82 BC
626–628	2585 ± 30 BP	2766 – 2701	784 ± 33 BC
668–670	3030 ± 35 BP	3355 – 3143	1299 ± 106 BC
716–718	3495 ± 35 BP	3865 – 3689	1827 ± 88 BC

Die ermittelten kalibrierten ^{14}C -Daten sind in Abbildung 7-1 (s. nächste Seite) präsentiert. Hinsichtlich der Torfakkumulation lassen sich drei Zeiträume unterscheiden, die sich in Akkumulationsraten ausdrücken lassen.

Als älteste Tiefe ist 716-718 cm mit einem Alter von 3835 ± 88 Jahren zu nennen. Von dieser Tiefe bis 516-518 cm, was einem Zeitraum von ca. 2000 Jahren entspricht, lässt sich eine Akkumulationsrate von ca. $0,9 \text{ mm a}^{-1}$ (Zeitraum 1) berechnen. In den darauf folgenden 600 Jahren ist die Akkumulationsrate mit ca. $5,8 \text{ mm a}^{-1}$ (Zeitraum 2) deutlich höher. Gefolgt wir diese Periode von einer Phase von weiteren 600 Jahren Torfwachstum von $1,8 \text{ mm a}^{-1}$ (Zeitraum 3). Über den Zeitraum von 1550 AD bis heute lässt sich hinsichtlich des Torfwachstums für dieses Profil keine Aussage treffen.

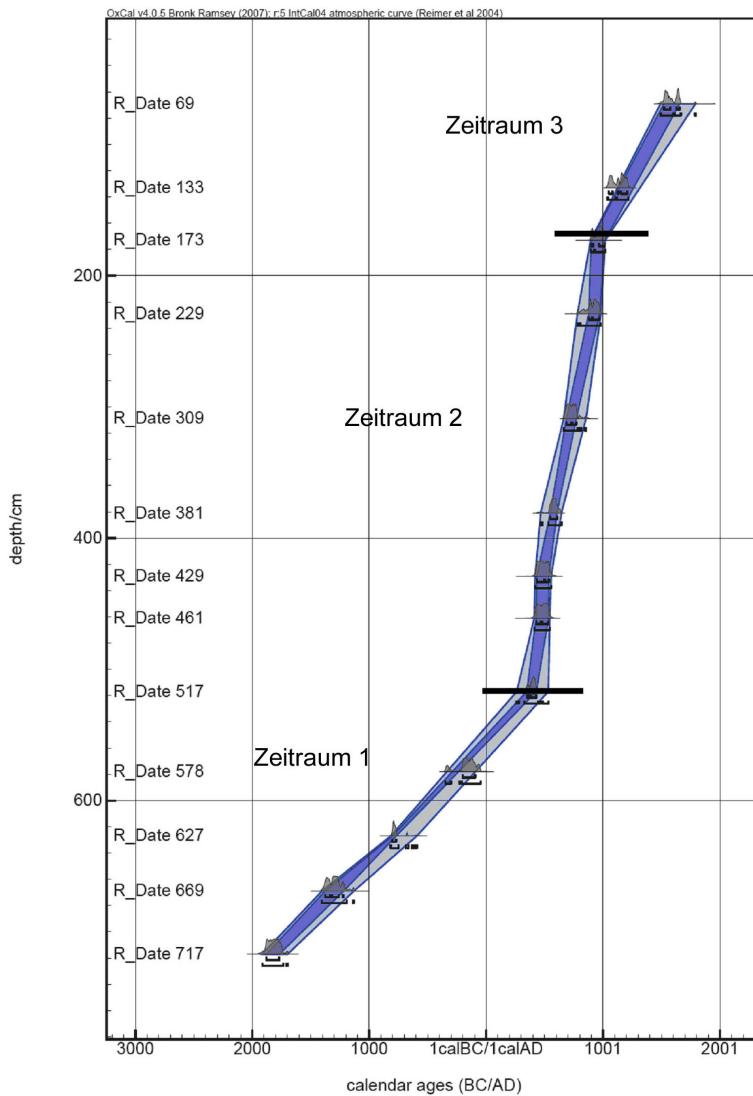


Abbildung 7-2: Ergebnisse der AMS ^{14}C -Datierung des Profils aus dem Dürren Maar, dargestellt in einem Zeit-Tiefenmodell (dunkelblau $\triangleq 1\sigma$ -Bereich und hellblau $\triangleq 2\sigma$ -Bereich des kalibrierten Bereichs). Das Modell wurde erstellt mit Oxcal 4.0.5 (RAMSEY 2008).

Die Akkumulationsrate in Zeitraum 1 für das Katotelm (ständig wassergesättigter Bereich des Moores), in dem Kompaktion und Zersetzung das Torfwachstum bereits verringern, entspricht dem in RYDIN UND JEGLUM (2008) angegebenen Wert von 1 mm a^{-1} . In Zeitraum 2 ist eine Erhöhung der Akkumulationsrate zu verzeichnen, was laut RYDIN UND JEGLUM (2008) im jüngeren Torf zu erwarten ist. Die Sprunghaftigkeit des Anstiegs könnte mit der Menge der gewonnenen Datenpunkte zusammenhängen. Durch mehr ^{14}C -Datierungen könnte wahrscheinlich eine genauere Torfwachstumskurve gewonnen werden. Dass in Zeitraum 3 die Torfakkumulation gegenüber Zeitraum 2 wieder abnimmt, entspricht nicht dem theoretischen Verlauf einer Torfakkumulation RYDIN UND JEGLUM (2008). Ein Alters-Tiefen-Modell eines Hochmoores in Nordost-Schottland wies jedoch eine ähnliche Unterteilung in 3

Akkumulationsabschnitte auf (BLUNDELL UND BARBER 2005). Die Änderungen in der Akkumulationsrate traten hier ca. 500 AD und ca. 1200 AD auf, also ca. 100 -200 Jahre später als in vorliegender Untersuchung. Die Richtung der Änderungen in der Torfakkumulation waren aber dieselben.

7.2 *Sphagnum*-Artenzusammensetzung des Profils und paläoökologische Bedeutung

In den oberen drei untersuchten Proben ist *Sphagnum magellanicum* die häufigste Komponente. Der Bereich umfasst die oberen 60 cm des Profils und deckt laut ¹⁴C-Altersdatierung maximal die letzten 400 Jahre ab. Die Art wurde in den letzten tausend Jahren in vielen Hochmooren dominant und hat breit gefächerte Biotopansprüche (MAUQUOY UND VAN GEEL 2007, OKLAND 1990).

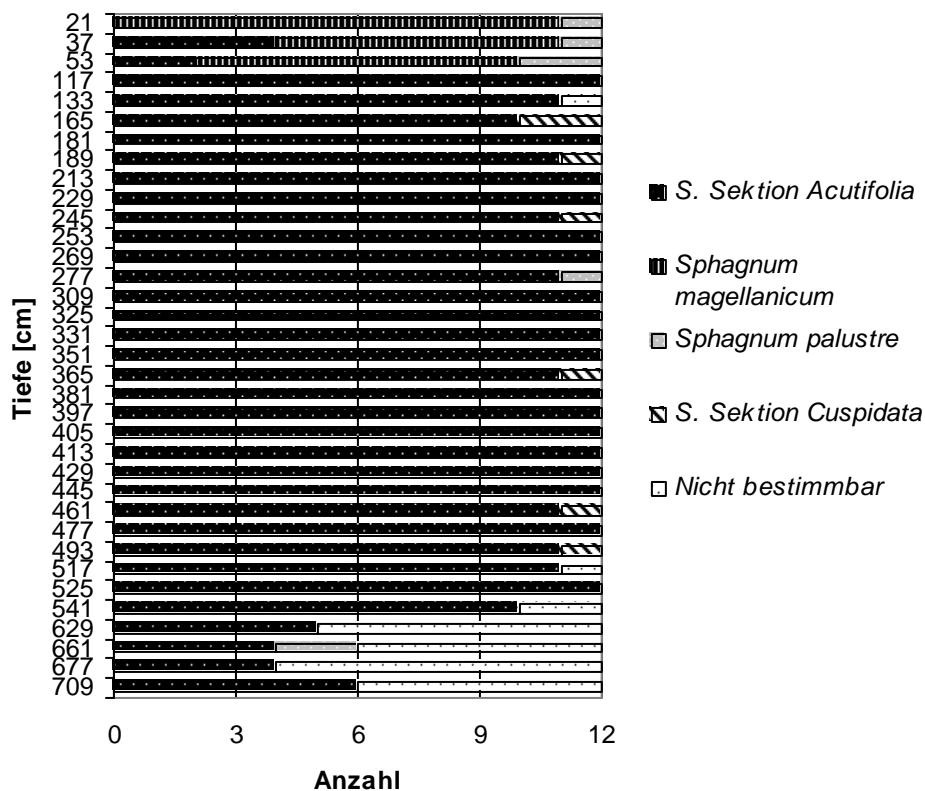


Abbildung 7-2: Darstellung der erfassten *Sphagnum*-Artenzusammensetzung. Erläuterung der *Sphagnum*-Taxa siehe Legende.

Sphagnum Sektion *Acutifolia* ist im Bereich der Tiefe 116 - 542 cm mit jeweils 11 bzw. 12 von 12 untersuchten Ästchen deutlich die dominierende Sektion. Der Anteil der Sektion in der Grundgesamtheit liegt nach der statistischen Abschätzung bei 61,2 % bis 100% im Falle von 11 von 12 Ästchen. Wenn 12 von 12 Ästchen einem Taxon

zugeordnet werden können, liegt der geschätzte Anteil zwischen 73,1 % und 100 % (s. Abbildung 8-1, Anhang).

Bulten werden typischerweise von der Sektion *Acutifolia* gebildet (RYDIN ET AL. 2006). Die Abschnitte des vorliegenden Profils, in denen die Sektion *Acutifolia* in den untersuchten Tiefen dominiert, lassen somit auf ein Vorliegen einer Bulte als erfasstes Mikrohabitat schließen. In nordwest-europäischen Mooren können vier verschiedene Arten dieser Sektion entsprechen. Zwei davon, nämlich *Sphagnum capillifolium* var. *rubellum* und *Sphagnum fuscum*, sind Bulten-Arten. Die ökologischen Ansprüche unterscheiden sich von denen von *Sphagnum molle* und *Sphagnum subnitens*, die Schlenken-Arten sind. *Sphagnum molle* ist jedoch normalerweise in Heidemooren zu finden und in Deutschland sonst sehr selten (FRAHM UND FREY 2004). Die Bestimmung der Arten wird durch die Überlappung der Blattlängen in dieser Sektion schwierig bis unmöglich. Somit wird die Genauigkeit jeder paläoökologischen Rekonstruktion von dieser Tatsache deutlich reduziert (MAUQUOY UND VAN GEEL 2007).

Nichtsdestotrotz weist die Konstanz der bestimmten Sektion auf eine Konstanz des Mikrohabitats hin, das durch den Kern erfasst wurde.

Viele paläobotanische Untersuchungen deuten darauf hin, dass ein Abwechseln von Bulten und Schlenken an einem Standort über die Zeit hinweg, entgegen früheren Annahmen, selten passiert. Vielmehr wurde beobachtet, dass Bulten über Jahrtausende am gleichen Ort im Moor bestehen bleiben. (CHARMAN 2002, BARBER 1981). Zudem fand BARBER (1981) bei einer Untersuchung hinsichtlich der Koexistenz von Sphagnen heraus, dass derselbe *Sphagnum*-Klon über Jahrhunderte in einem Moor überleben kann. Die Untersuchung erfolgte an einem zusammenhängenden Torfprofil von 10 *10 cm Durchmesser. In diesem konnten die einzelnen Arten über bis zu 1200 Jahre verfolgt werden.

Ab einer Tiefe von 626 cm ist die Zersetzung der Ästchen erhöht und führt dazu, dass nur noch maximal 50 % von ihnen bestimmt werden können.

7.3 Vergleich der Isotopenwerte der Fraktionen Stem, Branch und Bulk

7.3.1 $\delta^{13}\text{C}$ -Werte

In Abbildung 7-3 ist der Verlauf der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Fraktionen Branch und Stem dargestellt. Da die Standardabweichung bei Wiederholungsmessungen unter 0,1 ‰ und damit unterhalb der Messgenauigkeit lag, wurde auf eine Fehlerangabe im Diagramm verzichtet. Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von Branch und Stem erstrecken sich jeweils zwischen - 24,4 ‰ und - 26,1 ‰ und - 25,8 ‰ und - 27,6 ‰ (s. Tabelle 8-4, Anhang). Damit liegen sie in dem Wertebereich, der in einer vorherigen Studie von LOADER ET AL. (2007) an reinem *Sphagnum* in der Cellulose gemessen wurde. Die Minima sind in beiden Fraktionen in den oberen 310 cm zu finden.

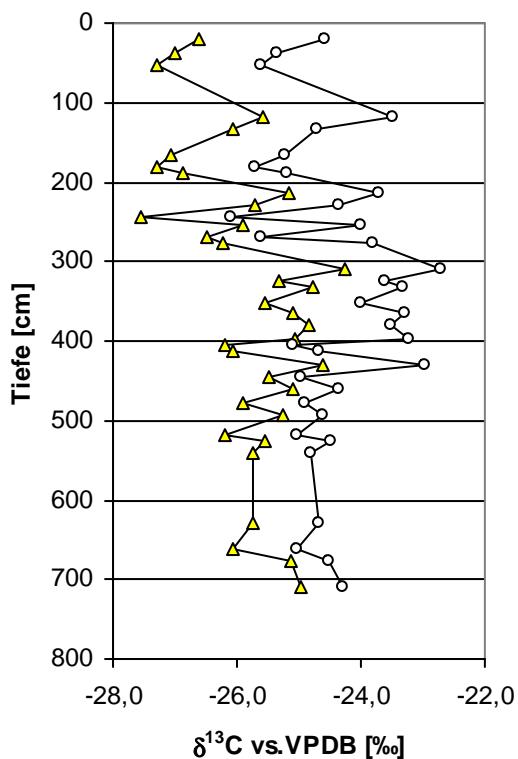


Abbildung 7-3: Vergleich der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte ($N = 35$) der Fraktionen Branch (Kreise) und Stem (gefüllte Dreiecke) in ‰.

In Abbildung 7-4 (s. nächste Seite) sind die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Fraktionen Branch und Stem jeweils denen der Fraktion Bulk gegenübergestellt. Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von Bulk liegen zwischen -22,9 ‰ und - 26,2 ‰. In einer Untersuchung von PANCOST ET AL. (2003), in der zermahlenes Bulkmaterial zur Gewinnung des Messgases genutzt

wurde, lagen die Werte insgesamt niedriger. Sie wiesen eine Streuung von $-24,5\text{ \textperthousand}$ bis $-30\text{ \textperthousand}$ auf. Auch im Bulk ist das Minimum in den oberen 310 cm zu finden.

Zwischen den Kombinationen Branch und Stem sowie Bulk und Stem ist deutlich eine Differenz zu erkennen, wobei Branch und Bulk jeweils höhere Werte als Stem aufweisen. Im Vergleich Bulk und Branch hingegen lässt sich ein ähnlicher Verlauf erkennen, jedoch weisen die Bulkproben teils höhere und teils niedrigere $\delta^{13}\text{C}$ -Werte als die Fraktion Branch auf.

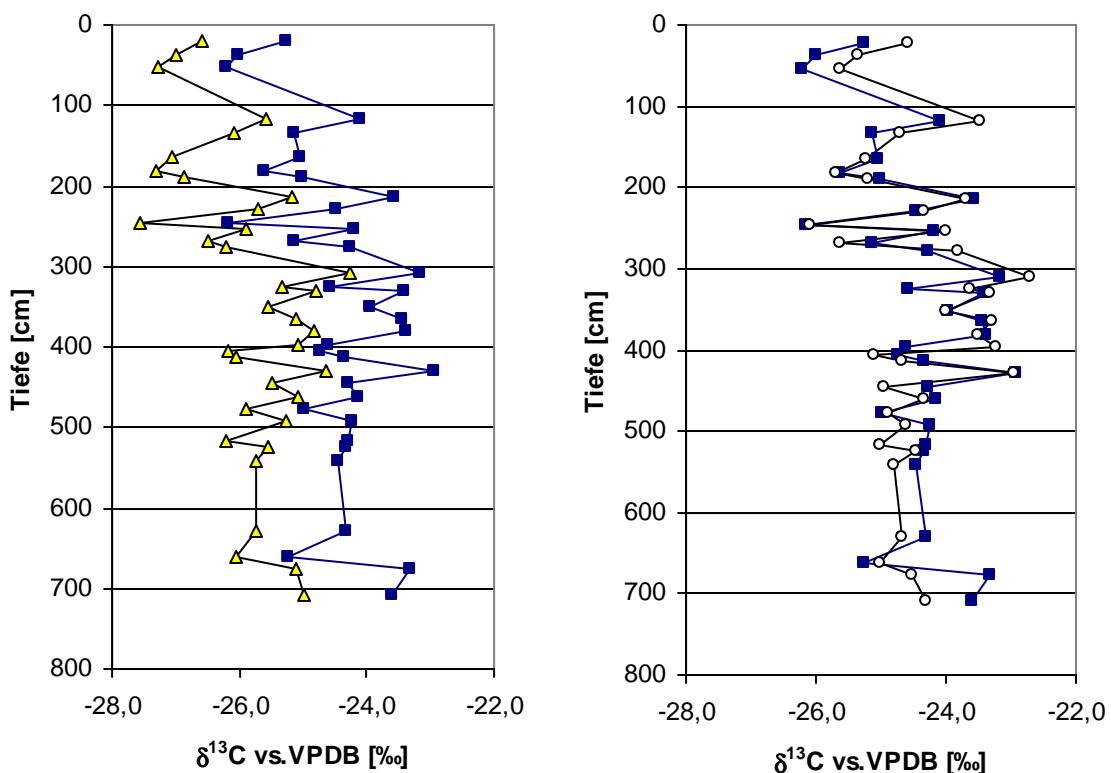


Abbildung 7-4: Vergleich der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte ($N = 35$) der Fraktion Bulk (gefüllte Quadrate) mit den Fraktionen Branch (Kreise) und Stem (gefüllte Dreiecke).

Die maximale und die minimale Differenz von Branch und Stem beträgt $2,4\text{ \textperthousand}$ und $0,5\text{ \textperthousand}$, von Bulk und Stem $2,0\text{ \textperthousand}$ und $0,5\text{ \textperthousand}$. Der betrachtete Unterschied der beiden verglichenen Fraktionen ist hoch signifikant (s. Tabelle 8-7, Anhang). Die Mediandifferenz von Branch und Stem beträgt $1,1\text{ \textperthousand}$ bei einer Standardabweichung von jeweils $0,85\text{ \textperthousand}$ und $0,82\text{ \textperthousand}$ (s. Tabelle 7-2).

In LOADER ET AL. 2007 wurde ebenso eine signifikante Mediandifferenz der Fraktionen Branch und Stem in der Höhe von $1,97\text{ \textperthousand}$ festgestellt, bei einer höheren Standardabweichung der Stichproben von je $1,22\text{ \textperthousand}$ und $1,18\text{ \textperthousand}$. Stem wies auch in dieser Untersuchung niedrigere Werte auf. In der Betrachtung der Kombination der Fraktionen Bulk und Stem findet sich eine Mediandifferenz von $1,4\text{ \textperthousand}$.

Tabelle 7-2: Deskriptive Parameter der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Fraktionen Bulk, Branch und Stem.

		$\delta^{13}\text{C}$ -Werte [%]			
Fraktion	N	Standard-abweichung	Variationsbreite	Median	Mediandifferenz zu Stem
Stem	35	0,82	3,3	-25,7	-
Bulk	35	0,84	3,3	-24,3	1,4
Branch	35	0,85	3,4	-24,6	1,1

Für die gemessenen $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der drei Fraktionen ist in allen Kombinationen eine hohe positive Korrelation festzustellen, die hoch signifikant ist (s. Tabelle 7-3).

Tabelle 7-3: Ergebnisse der Korrelationsanalyse nach Spearman.

$\delta^{13}\text{C}$ - Werte			
Vergleich der Fraktionen	N	Korrelationskoeffizient	Signifikanz (2-seitig)
Bulk / Branch	35 / 35	0,79	0,00
Bulk / Stem	35 / 35	0,85	0,00
Branch / Stem	35 / 35	0,84	0,00

Der Unterschied zwischen den Fraktionen Branch und Stem weist auf eine unterschiedliche Fraktionierung in den Teilen der Pflanze hin. Ob die Pflanzenphysiologie (s. Kap. 2) oder eine mögliche Ungleichheit in der CO_2 -Verfügbarkeit (s. Kap. 3.3.2) dafür verantwortlich sind, müsste in entsprechenden Untersuchungen genauer geprüft werden.

Die Lage der Pflanzenteile im Mikrohabitat könnte außerdem eine Rolle spielen: *Sphagnum* in Mooren wächst in dichten Polstern, die umso dichter werden, je weiter sie von der Wasseroberfläche entfernt sind (RYDIN ET AL. 2001). Licht dringt in diese Polster nur wenige Zentimeter ein. Dabei ist die Photosynthese fast ausschließlich auf das Kapitulum beschränkt, in dem die Ästchen gebildet werden (RYDIN UND JEGLUM 2008). Eine Hypothese zur Erklärung der beobachteten Differenzen der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte wäre also eine unterschiedlich starke Fraktionierung am Ort der Bildung der Stämmchen durch Schwankungen in der Photosyntheseaktivität (s. Kap 3.3.2).

Die Minima der Fraktionen Stem und Branch sind jeweils in den oberen 310 cm zu finden. Die niedrigeren Werte lassen auf trockenere Phasen während der Moorentwicklung schließen. Dies wird bedingt durch die höhere Diffusivität des CO_2 aufgrund der geringeren Wasserbarriere in den Hyalocyten und somit einer erhöhten Diskriminierung von $^{13}\text{CO}_2$ (WILLIAMS UND FLANAGAN 1996, Ménot und Burns 2001). Andererseits dominiert in den jüngsten drei Proben laut ermittelter Artenzusammensetzung *Sphagnum magellanicum*. Dieses wird in Analysen von Makrofossilien als Indikator für feuchtere Verhältnisse der Mooroberfläche eingestuft

als beispielsweise Sektion *Acutifolia* (BLUNDELL UND BARBER 2005). In Tiefe 117 cm ist jedoch eine Dominanz der Sektion *Acutifolia* zu verzeichnen. Gleichzeitig ist der $\delta^{13}\text{C}$ -Wert in Branch und Stem mit jeweils 2,1 ‰ und 1,7 ‰ deutlich höher als in der vorherigen Tiefe 53 cm. Da Sektion *Acutifolia*, wie eben beschrieben, jedoch trockenere Verhältnisse repräsentieren soll, wären niedrigere Werte zu erwarten. Die Variation des Quellwertes (s. Kap. 3.2) von 0,3 ‰ im Untersuchungszeitraum ist bei der Höhe der betrachteten Schwankungen vernachlässigbar.

Aus der festgestellten hohen Korrelation der Stichproben lässt sich schließen, dass derselbe äußere Einfluss in den Werten der Fraktionen wiedergegeben wird. Auch die deskriptiven Parameter zeigen sehr ähnliche Werte in der Standardabweichung und Variationsbreite. Eine Verwendung der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der betrachteten Fraktionen als Klima-Proxy scheint, hinsichtlich der Veränderung innerhalb der Stichprobe, für jede einzelne möglich. Der Vergleich der absoluten Werte der Fraktionen Branch und Stem zeigt einen deutlichen Unterschied, weshalb bei einer Analyse von Torfmaterial immer eine einzelne der Fraktionen untersucht werden sollte. Eine Untersuchung von Fraktionen, die eine Zusammenfassung aller Sphagnen oder Moose darstellen, könnte zu Fehlinterpretationen der Werte führen. Diese könnten darin liegen, dass nicht ein Signal der Umweltbedingungen erfasst wird, sondern die Zusammensetzung hinsichtlich der Anteile der Pflanzenarten bzw. Pflanzenbestandteile. Um eine genauere Aussage über die Korrelation von Bulk mit den Fraktionen Stem und Branch treffen zu können, müsste eine genaue Analyse der Bestandteile von Bulk erfolgen. Dies liegt darin begründet, dass der Kern in Abschnitten aus fast reinem Sphagnumtorf besteht. Die Bulkprobe könnte in einigen Fällen ein aus den Fraktionen Branch und Stem zusammengesetztes Signal wiedergeben.

7.3.2 $\delta^{18}\text{O}$ -Werte

Der Verlauf der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im untersuchten Profil ist in Abbildung 7-5 dargestellt. Die Minima und Maxima der Fraktionen Branch und Stem liegen bei 24,9 ‰ und 29,1 ‰ bzw. 23,9 ‰ und 27,7 ‰ (s. Tab. 8-3, Anhang). Die zwei niedrigsten Werte aller Proben sind jeweils in den jüngsten drei untersuchten Tiefen zu finden.

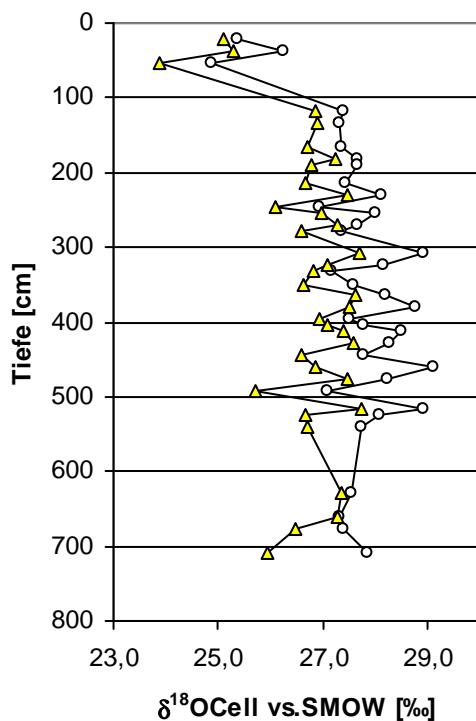


Abbildung 7-5: Vergleich der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte ($N = 35$) der Fraktionen Branch (Kreise) und Stem (gefüllte Dreiecke) in ‰.

Für die Fraktion Branch liegen die niedrigsten Messwerte 25,4 ‰ und 24,9 ‰ in den Tiefen 21 cm und 53 cm um 2,8 ‰ bzw. 2,3 ‰ unter dem Median (s. Tabelle 7-4) der Datenreihe. Ab der vierten untersuchten Tiefe, also ab 117 cm, erstrecken sich fast alle Werte zwischen 27 ‰ und 29 ‰.

Dasselbe Muster ist für die Fraktion Stem zu beobachten: Die niedrigsten Messwerte sind in den Tiefen 21 cm und 53 cm zu finden. Die Abweichung der beiden Minima vom Median beträgt 1,8 ‰ bzw. 3 ‰. Im weiteren Verlauf bewegen sich die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von Stem zwischen 26 ‰ und 28 ‰. In Abbildung 7-6 sind die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Fraktionen Branch und Stem jeweils denen der Fraktion Bulk gegenübergestellt.

Der Verlauf der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von Bulk weist mit Ausnahme einer Probe niedrigere Werte als Fraktion Branch auf. Ein Vergleich der Fraktion Bulk mit Stem deutet auf eine

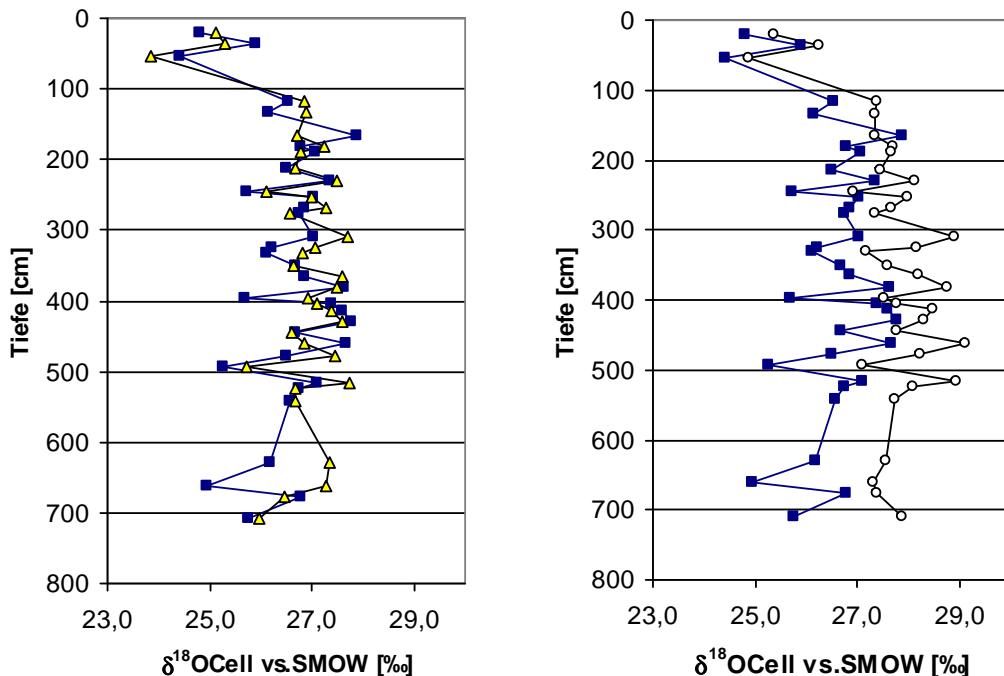


Abbildung 7-6: Vergleich der $\delta^{18}\text{O}$ - Werte ($N = 35$) der Fraktion Bulk (gefüllte Quadrate) mit den Fraktionen Branch (Kreise) und Stem (gefüllte Dreiecke).

Korrelation der beiden hin, wobei die Werte von Stem in gleicher Tiefe teils niedriger, teils höher als bei Bulk sind. Der U-Test nach Mann und Whitney weist einen signifikanten Unterschied zwischen den Werten von Branch und Stem sowie Bulk und Branch aus (s. Tabelle 8-7, Anhang). Die Mediandifferenz beträgt jeweils 0,8 ‰ und 1 ‰ (s. Tabelle 7-4). Die maximale und die minimale Differenz zwischen Branch und Stem beträgt 2,2 ‰ und 0 ‰, zwischen Bulk und Branch 2,4 ‰ und 0,4 ‰.

Tabelle 7-4: Deskriptive Parameter der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Fraktionen Bulk, Branch und Stem.

		$\delta^{18}\text{O} - \text{Werte [\%]}$			
Fraktion	N	Standard-abweichung	Variationsbreite	Median	Mediandifferenz zu Branch
Branch	35	0,87	4,2	27,7	-
Stem	35	0,81	3,9	26,9	0,8
Bulk	35	0,85	3,4	26,7	1,0

Die Fraktionen Bulk und Branch und Branch und Stem zeigen jeweils hoch signifikante hohe positive Korrelation (s. Tabelle 7-5). Zwischen den Fraktionen Bulk und Stem ist eine hoch signifikante mittlere positive Korrelation festzustellen.

Die Bulk- $\delta^{18}\text{O}$ -Werte zeigen eine Variation von 24,4 ‰ bis 27,9 ‰. Sie liegen damit in einem ähnlichen Wertebereich einer vergleichbaren Untersuchung in Mitteleuropa von BRENNINKMEIJER ET AL. (1982).

Tabelle 7-5: Ergebnisse der Korrelationsanalyse nach Spearman.

$\delta^{18}\text{O}$ - Werte			
Vergleich der Fraktionen	N	Korrelationskoeffizient	Signifikanz (2-seitig)
Bulk / Branch	35 / 35	0,70	0,00
Bulk / Stem	35 / 35	0,55	0,00
Branch / Stem	35 / 35	0,71	0,00

Betreffend der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Fraktionen Branch und Stem gibt es keine ähnlichen Untersuchungen. Die Variation zwischen 24 ‰ und 29 ‰ ist verglichen mit Messungen an rezentem *Sphagnum*-Pflanzenmaterial, welches eine Variabilität von 19 ‰ - 24 ‰ zeigt, im Mittel deutlich höher (MENOT-COMBES ET AL. 2002, ARAVENA UND WARNER 1992).

Auffällig ist das Auftreten der niedrigsten Werte in allen drei Fraktionen in den jüngsten drei Proben. Die festgestellte Artenzusammensetzung mit einer Dominanz von *Sphagnum magellanicum*, die in den darauf folgenden untersuchten Proben zu Sektion *Acutifolia* wechselt, deutet auf eine Artabhängigkeit der gemessenen $\delta^{18}\text{O}$ -Werte hin.

Sphagnum magellanicum wies schon in ARAVENA UND WARNER (1992) um ca. 2 ‰ niedrigere $\delta^{18}\text{O}$ -Werte als *Sphagnum fuscum* und *Sphagnum capillifolium* auf, welche Arten der Sektion *Acutifolia* sind.

Der Unterschied in den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten von Branch und Stem weist darauf hin, dass in der Pflanze im Bereich der Ästchen eine stärkere Fraktionierung der Sauerstoffisotope stattfindet als im Stämmchen. Eine Erklärung hierfür kann sein, dass die Blätter an den Ästchen eine große Oberfläche haben und der Evaporation deutlich stärker ausgesetzt sind als die Stämmchen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass beide Seiten der Blättchen der Luft ausgesetzt sind und die Blättchen nur aus einer Zellschicht aufgebaut sind (s. Kap 2). Außerdem liegt das Kapitulum, in dem die Ästchen gebildet werden, an der Oberfläche des Sphagnumpolsters. Die leichten Isotope gehen bevorzugt in die Dampfphase über, wodurch das Blattwasser an schweren Isotopen angereichert wird. Dieser Effekt ist für Gefäßpflanzen gezeigt worden (YAKIR 1992). Das Blattwasser beeinflusst dann die Isotopenzusammensetzung der Cellulose (YAKIR 1992, FARQUHAR UND LLOYD 1993).

Unter der Annahme, dass die Evaporation in den Ästchen höher ist, würde dies dort zu einem höheren $\delta^{18}\text{O}$ -Ausgangswert des Blattwassers führen als in den Stämmchen. Dieser erhöhte $\delta^{18}\text{O}$ -Wert bedingt dann einen höheren $\delta^{18}\text{O}$ -Wert der Cellulose in den Ästchen.

Bei einem konstanten Quellwert, in einem Hochmoor einem konstanten $\delta^{18}\text{O}$ -Wert des Niederschlags entsprechend, drückt sich also in der Cellulose der Pflanzen die

Intensität der Evapotranspiration aus. Um die Variation der Isotopenzusammensetzung im Niederschlag festzustellen, sollte eine Untersuchung der Sphagnumarten, die zwischen 5 cm unter dem Wasserspiegel bis 20 cm über dem Wasserspiegel wachsen, erfolgen. Diese Arten leben zeitweise untergetaucht und geben den Sauerstoffisotopenwert des Moorwassers besser wieder (RYDIN UND JEGLUM 2008, ZANAZZI UND MORA 2005). Das entsprechende Mikrohabitat würde aus Schlenken und Moortümpeln bestehen.

Die Verläufe der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der drei Fraktionen zeigen untereinander eine mittlere bis hohe Korrelation. Auch die deskriptiven Parameter sind besonders in Branch und Stem ähnlich. Aufgrund dessen scheint eine Verwendung der Fraktionen als Klimaproxy möglich. Dabei sollte jede Fraktion einzeln betrachtet werden. Da die Differenzen der Fraktionen deutliche Variationen aufweisen, könnte das Signal einer kombinierten Fraktion einen anderen Verlauf zeigen als die Einzelsignale. Solche in früheren Untersuchungen zusammengefasste Fraktionen sind *Sphagnum*-Material ohne eine Unterscheidung von Ästchen und Stämmchen (ARAVENA UND WARNER 1992, MENOT-COMBES ET AL. 2002) und Bulk-Material (HONG ET AL. 2000, AUCOUR ET AL. 1996). Aufgrund des beobachteten Medianunterschiedes müsste eine genaue Analyse des der chemischen Extraktion unterzogenen Materials hinsichtlich der Gewichtsanteile der Fraktionen durchgeführt werden. Ansonsten kann man nicht ausschließen, dass eine Signaländerung aus einem veränderten Verhältnis von Anteilen der Fraktionen entsteht. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von Branch beispielsweise liegen im Median um 0,8 ‰ höher als Stem. Wenn nun in einer Probe von *Sphagnum*-Material der Anteil der Fraktion Stem dominiert, wird das insgesamt niedrigere Signal von Stem sich im Isotopenwert abbilden. Unter der Annahme, dass in der Probe der nächsten untersuchten Tiefe nun Branch den höheren Gewichtsanteil hat, würde das allgemein höhere Signal von Branch die Probe beeinflussen. Wenn nun die Differenz zwischen den Proben betrachtet wird, könnte damit das Ergebnis ohne Berücksichtigung der Verschiebung des Gewichtsanteils fälschlicherweise als Veränderung der Umweltbedingungen interpretiert werden.

Es sollte eine zusätzliche paläobotanische Datenerhebung an den Proben durchgeführt werden. Die genaue Zusammensetzung der Bulkproben, beziehungsweise das Artenspektrum der Sphagnen, könnte somit parallel zu einer Analyse der stabilen Isotope betrachtet werden. Eine Interpretation des Isotopensignals könnte dadurch z.B. artspezifische Unterschiede in der Wiedergabe von Umweltbedingungen berücksichtigen.

7.4 Vergleich der Fraktionen *Eriophorum spec.* und *Vaccinium* (subgenus *oxycoccus*) mit Bulk und Stem

7.4.1 $\delta^{13}\text{C}$ -Werte

Die Variation der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Fraktion *Vaccinium* beträgt 3,5 ‰. Die Werte liegen zwischen - 23,1 ‰ und - 26,6 ‰ (s. Abbildung 7-7). Die Werte in einer Messung an Cellulose aus rezentem *Vaccinium uliginosum* Material lagen zwischen - 23 ‰ und - 26 ‰ (MÉNOT UND BURNS 2001).

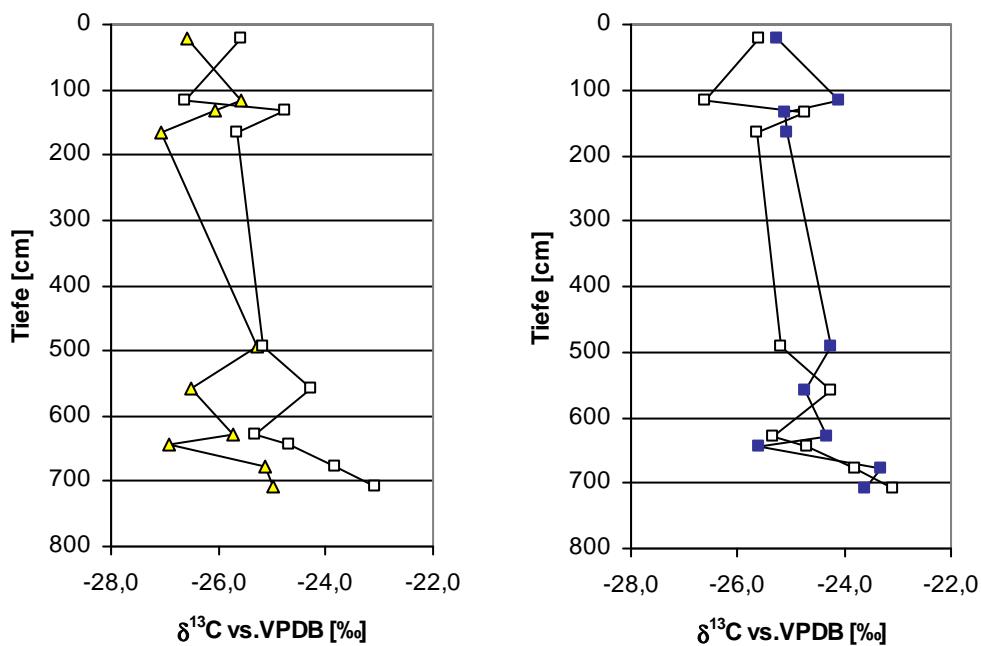


Abbildung 7-7: Vergleich der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte ($N = 10$) der Fraktion *Vaccinium* (leere Quadrate) mit den Fraktionen Bulk (gefüllte Quadrate) und Stem (gefüllte Dreiecke).

Im Verlauf der Kohlenstoffisotopenwerte von *Vaccinium* im Vergleich zu Stem ist außer einem Wert jeder höher als Stem. Der Unterschied dieser beiden Fraktionen ist signifikant (s. Tabelle 8-7, Anhang) und drückt sich in einer Mediandifferenz von 0,9 ‰ aus (s. Tabelle 7-6).

Tabelle 7-6: Deskriptive Parameter der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Fraktionen *Vaccinium*, *Eriophorum*, Bulk und Stem.

Fraktion N	$\delta^{13}\text{C}$ – Werte [‰]				Mediandifferenz zu Vaccinium
	Standard-abweichung	Variationsbreite	Median		
Vaccinium 10	1,01	3,5	-25,0		-
Stem 10	0,76	2,1	-25,9		0,9
					Mediandifferenz zu Eriophorum
Eriophorum 12	0,84	3,1	-23,0		-
Bulk 12	0,81	3,1	-24,8		1,8
Stem 12	0,86	3,0	-26,3		3,3

In der Fraktion Eriophorum ist eine Variation der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von 3,1 ‰ mit einem Minimum und einem Maximum von - 22,1 ‰ bzw. - 25,2 ‰ zu beobachten (s. Abbildung 7-8). MÉNOT UND BURNS (2001) maßen an der Cellulose von rezentem *Eriophorum vaginatum* Werte zwischen - 22,5 ‰ und - 26 ‰. Die Kohlenstoffisotopenwerte sind in ihrem Verlauf jeweils höher als die der Fraktionen Stem und Bulk. Die Mediandifferenz zwischen Eriophorum und Stem ist mit 3,3 ‰ auffallend hoch.

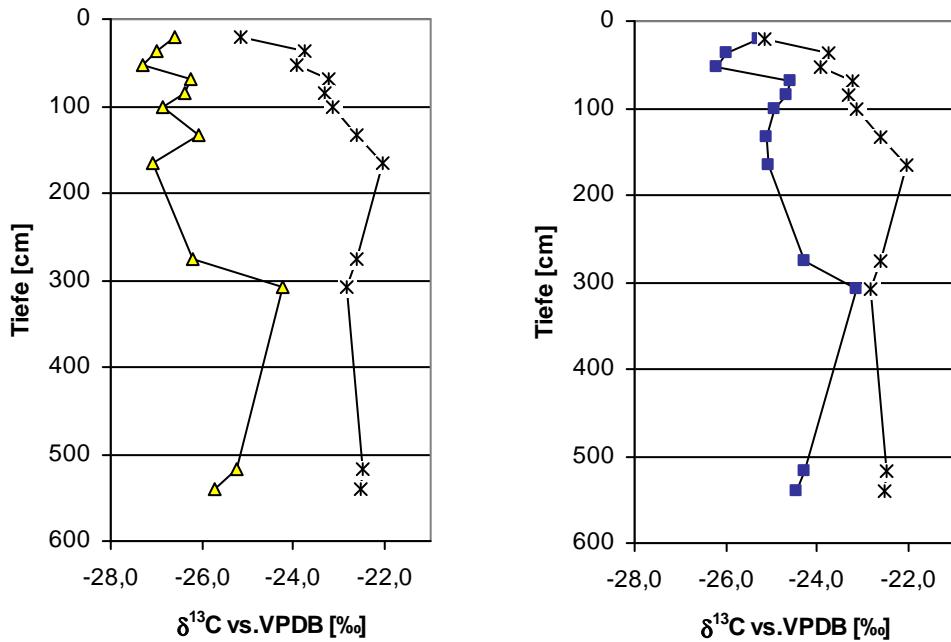


Abbildung 7-8: Vergleich der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte ($N = 12$) der Fraktion Eriophorum (Kreuze) mit den Fraktionen Bulk (gefüllte Quadrate) und Stem (gefüllte Dreiecke).

Eine Korrelationsanalyse der Fraktionen zeigt geringe bis mittlere positive Korrelationen, die alle nicht signifikant sind (s. Tabelle 7-7).

Zu erwarten wäre eine negative Korrelation zwischen den Gefäßpflanzen und der Fraktion Stem. Ein Anstieg in den $\delta^{13}\text{C}$ -Werten einer Gefäßpflanze sollte theoretisch mit einer Abnahme in den $\delta^{13}\text{C}$ -Werten von *Sphagnum* einhergehen. Wie in Kapitel 3.3.1 und 3.3.2 beschrieben sind die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Cellulose unter anderem von der Verfügbarkeit von CO_2 abhängig. Dabei wirken folgende Prozesse:

Herrschen feuchte und kühle Verhältnisse, verbunden mit hoher Luftfeuchte, öffnen die Gefäßpflanzen die Stomata weit. Dies führt zu hohen CO_2 -Konzentrationen innerhalb der Pflanze, wodurch die Photosynthese der bestimmende Fraktionierungsfaktor wird. Die Diffusion von CO_2 in die Pflanze als Faktor, der die Fraktionierung bestimmt, tritt in den Hintergrund. Dies bedingt niedrige $\delta^{13}\text{C}$ -Werte. Ist es nun warm und trocken, werden die Stomata geschlossen und die Diffusion von CO_2 unterbunden. Dies führt zu niedrigen CO_2 -Konzentrationen innerhalb der Pflanze, wodurch für die Photosynthese

sowohl die schwereren als auch die leichteren C-Isotope genutzt werden müssen. Die Diskriminierung des schwereren ^{13}C durch die Photosynthese findet nicht mehr so ausgeprägt statt und die Fraktionierung durch Diffusion wird zum bestimmenden Faktor für den Isotopenwert. Dies führt zu hohen $\delta^{13}\text{C}$ -Werten (TREYDTE ET AL. 2004).

Im Falle der Sphagnen ist es genau umgekehrt. Herrschen feuchtere Verhältnisse, werden die Hyalocyten stärker mit Wasser gefüllt und so die Chlorocyten von einer Wasserschicht umgeben. Die Diffusion von CO_2 in die Pflanze wird durch diese Schicht gehemmt, da der Diffusionskoeffizient von Wasser deutlich höher ist als derjenige von Luft. Die Fraktionierung wird bestimmt durch die Diffusion von CO_2 , was zu hohen $\delta^{13}\text{C}$ -Werten führt. Umgekehrt liegt bei trockeneren Verhältnissen eine dünne Wasserschicht vor, die eine höhere Diffusion von CO_2 zulässt. Der bestimmende Faktor der Fraktionierung ist dann die Assimilation durch Photosynthese (WILLIAMS UND FLANAGAN 1996, MÉNOT UND BURNS 2001, FARQUHAR ET AL. 1989).

Da die erwartete negative Korrelation nicht auftritt, scheinen andere Faktoren die Fraktionierung in stärkerem Maße zu bestimmen. Eine weitere Erklärung wäre, dass die Variabilität der Umweltfaktoren im Untersuchungszeitraum zu gering ausfällt, um ein stärkeres Signal zu erhalten. Zusätzlich müsste die Artenzusammensetzung von *Sphagnum* genauer bestimmt werden können, um ein artspezifisches Signal berücksichtigen zu können. Für eine klarere Aussage wäre eine höhere zeitliche Auflösung, verbunden mit einer höheren Probenzahl, für eine Berechnung der Korrelation von Vorteil.

Tabelle 7-7: Ergebnisse der Korrelationsanalyse nach Spearman.

Vergleich der Fraktionen	$\delta^{13}\text{C}$ – Werte		
	N	Korrelationskoeffizient	Signifikanz (2-seitig)
Stem / Vaccinium	10 / 10	0,44	0,20
Vaccinium / Bulk	10 / 10	0,29	0,43
Eriophorum / Bulk	12 / 12	0,53	0,08
Eriophorum / Stem	12 / 12	0,46	0,13

Höhere Werte von Seggen gegenüber Moosen haben auch White et al. (1994) gemessen, wobei allerdings zu beachten ist, dass hier die allgemein gehaltenen Fraktionen „Moose“ und „Seggen“ verglichen wurden. Der vorgefundene deutliche Unterschied zwischen Eriophorum und Stem lässt sich in Untersuchungen an rezenten Pflanzen nicht wiederfinden (MÉNOT UND BURNS 2001). Weitere Untersuchungen an Torfprofilen, die einen Vergleich zwischen den einzelnen Arten von Gefäßpflanzen und Sphagnen beschreiben, liegen nicht vor.

Es sind hohe Abweichungen der Kohlenstoffisotopenwerte der Gefäßpflanzen von denen von *Sphagnum* Branch und Stem festzustellen. Außerdem zeigen die Werte nicht die erwartete Korrelation. Diese Faktoren sind weitere Hinweise darauf, dass eine Verwendung des Signals von Bulk als Klimaproxy zu falschen Interpretationen führen kann.

7.4.2 $\delta^{18}\text{O}$ - Werte

Der Verlauf der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Fraktion Vaccinium lässt einen Unterschied zu den beiden Fraktionen Stem und Bulk erkennen (s. Abbildung 7-9). Mit Ausnahme jeweils eines Wertes weist Vaccinium höhere Werte auf. Stem liegt im Median 0,9 ‰ und Bulk 1,5 ‰ niedriger als Vaccinium (s. Tabelle 7-8).

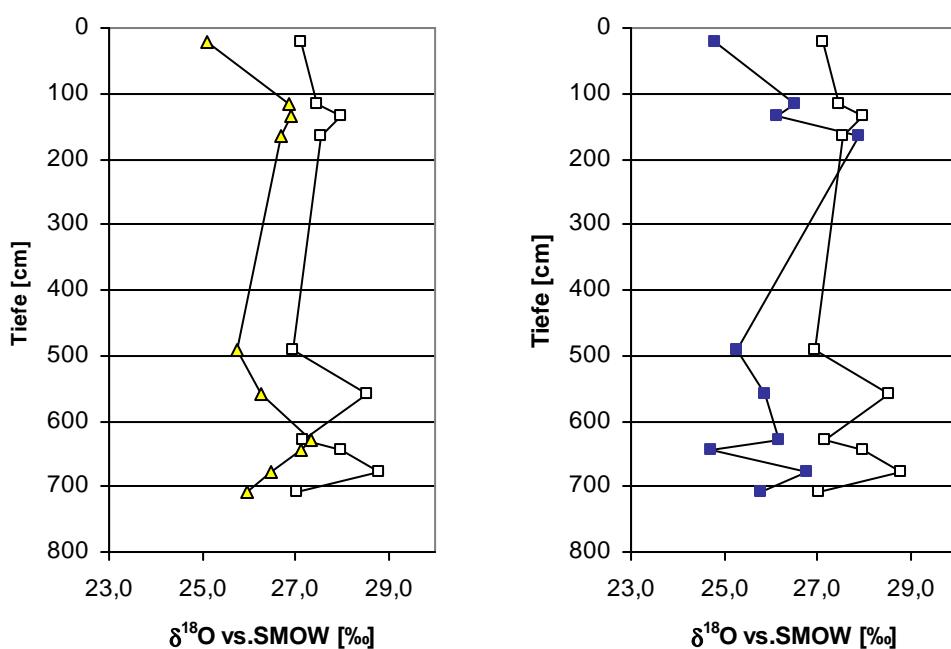


Abbildung 7-9: Vergleich der $\delta^{18}\text{O}$ - Werte ($N = 10$) der Fraktion Vaccinium (leere Quadrate) mit den Fraktionen Bulk (gefüllte Quadrate) und Stem (gefüllte Dreiecke).

Die Werte von Vaccinium variieren zwischen 26,9 ‰ und 28,8 ‰. MÉNOT-COMBES ET AL. (2002) maßen an rezenten *Vaccinium uliginosum* Pflanzen Werte zwischen 23 ‰ und 27 ‰. Die Werte sind also höher angesiedelt als in *Vaccinium uliginosum* und zeigen eine geringere Variationsbreite von 1,9 ‰.

Tabelle 7-8: Deskriptive Parameter der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Fraktionen Vaccinium, Eriophorum, Bulk, und Stem.

Fraktion	N	$\delta^{18}\text{O}$ - Werte [%]			Mediandifferenz zu Vaccinium
		Standard-abweichung	Variationsbreite	Median	
Vaccinium	10	0,65	1,9	27,5	-
Stem	10	0,69	2,2	26,6	0,9
Bulk	10	0,95	3,2	26,0	1,5
					Mediandifferenz zu Eriophorum
Eriophorum	12	0,58	1,9	28,3	-
Bulk	12	0,97	3,4	26,4	1,9
Stem	12	1,01	3,8	26,5	1,8

Die Fraktion Eriophorum weist in allen Tiefen höhere $\delta^{18}\text{O}$ -Werte als Stem und Bulk auf (s. Abbildung 7-10). Die niedrigste Differenz der einzelnen Werte von Eriophorum und Stem beträgt 0,9 ‰, für die Fraktionen Eriophorum und Bulk beträgt sie 1 ‰. Insgesamt liegt der jeweilige Medianunterschied der Fraktionen bei 1,8 ‰ und 1,9 ‰.

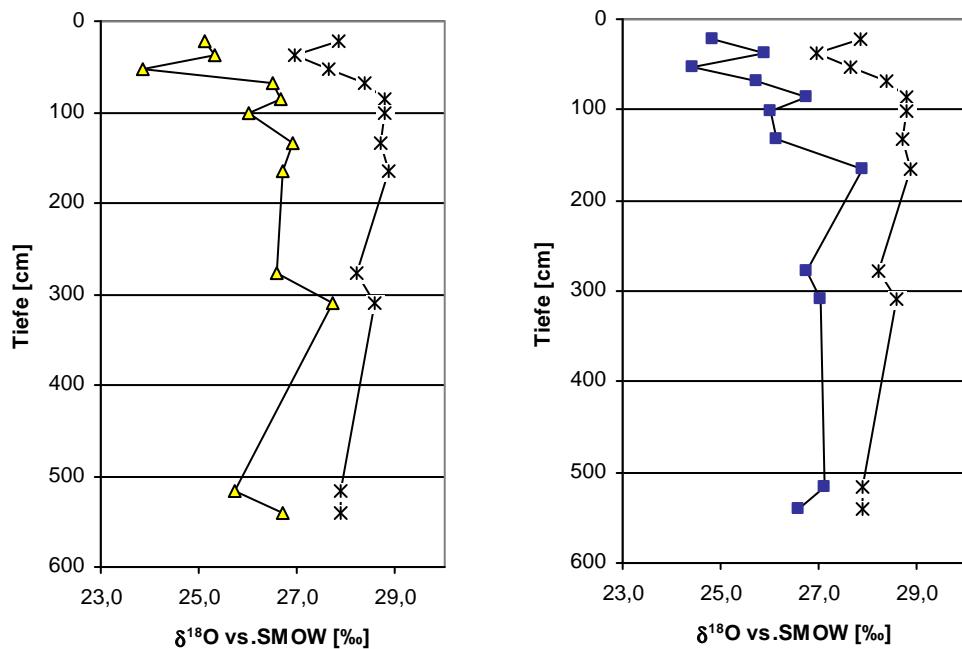


Abbildung 7-10: Vergleich der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte ($N = 12$) der Fraktion Eriophorum (Kreuze) mit den Fraktionen Bulk (gefüllte Quadrate) und Stem (gefüllte Dreiecke).

Die von MENOT-COMBES ET AL. (2002) gemessenen Werte rezenter Pflanzen zeigten für *Vaccinium uliginosum* jeweils um ca. 2 ‰ höhere Werte als die untersuchten Sphagnumarten *Sphagnum magellanicum* und *Sphagnum capillifolium*. *Eriophorum vaginatum* wies in derselben Untersuchung sogar 2-4 ‰ höhere Werte auf als *Sphagnum magellanicum* und *Sphagnum capillifolium*.

Die Korrelation zwischen der Fraktion Vaccinium und Stem bzw. Bulk ist gering und nicht signifikant. Eriophorum zeigt eine mittlere nicht signifikante positive Korrelation mit Bulk und eine hohe positive Korrelation mit Stem, die signifikant ist (s. Tabelle 7-9).

Tabelle 7-9: Ergebnisse der Korrelationsanalyse nach Spearman.

$\delta^{18}\text{O}$ – Werte			
Vergleich der Fraktionen	N	Korrelationskoeffizient	Signifikanz (2-seitig)
Stem / Vaccinium	10 / 10	0,41	0,24
Vaccinium / Bulk	10 / 10	0,33	0,35
Eriophorum / Bulk	12 / 12	0,52	0,08
Eriophorum / Stem	12 / 12	0,71	0,01

Die erwartete Korrelation bei einem Vergleich der Gefäßpflanzen und Branch bzw. Stem sollte positiv sein. Der Einbau des Sauerstoffs aus dem zur Photosynthese verwendeten Wassers in die Cellulose sollte sowohl in Gefäßpflanzen wie auch in *Sphagnum* das gleiche Signal abbilden (s. Kap. 3.3.1 und 3.3.2). Die Möglichkeit der Gefäßpflanzen den Wasserverlust zu regulieren, kann einen Unterschied in der Stärke der Fraktionierung bedingen.

Außerdem spielt im Signal der Sphagnen die Ökologie der Arten eine Rolle für die Stärke der Fraktionierung. So stellten ZANAZZI UND MORA (2005) eine Variabilität der Differenz zwischen $\delta^{18}\text{O}$ der Cellulose und $\delta^{18}\text{O}$ der Wasserquelle von $27 \pm 1\text{‰}$ der Sphagnumarten aus Schlenken fest. Die Variabilität der Sphagnumarten von Bulten lag bei $27 \pm 3\text{‰}$. Dieser Unterschied ist auf einen Verdunstungseffekt der Moose von Bulten zurückzuführen (ZANAZZI UND MORA 2005).

Um eine Abschätzung des $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenverhältnis des Moorwassers zu machen sollte eine Untersuchung auf die Schlenkenarten abzielen. Als Mikrohabitat für die Entnahme des Bohrkerns sollte also eine Schlenke ausgewählt werden.

7.5 Differenzen der Isotopenwerte aller Fraktionen

Um eine mögliche signifikante Veränderung in der Differenz der Isotopenverhältnisse der Fraktionen über den Verlauf der Tiefe hin zu erfassen, wurde eine Korrelationsanalyse nach Spearman zwischen diesen Differenzen und der Tiefe durchgeführt. Es wurden für alle Kombinationen der Fraktionen Differenzen berechnet und getestet (s. Tabelle 8-9, Anhang).

Die Korrelation der Differenz der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte mit der Tiefe ist im Fall von zwei Kombinationen signifikant. Die Differenz von Bulk und Branch (s. Abbildung 7-11) zeigt eine mittlere ($r = -0,56$) negative Korrelation mit der Tiefe, die hoch signifikant ist. Die Differenzen weisen in den oberen 300 cm des Kerns Werte zwischen 0,4 ‰ und 1,2 ‰ Abweichung auf. In den folgenden 400 cm ist die geringste Differenz 0,4 ‰, die höchste 2,4 ‰. Auffallend ist, dass ab einer Tiefe von 445 cm alle Werte bis auf einen über 1 ‰ liegen.

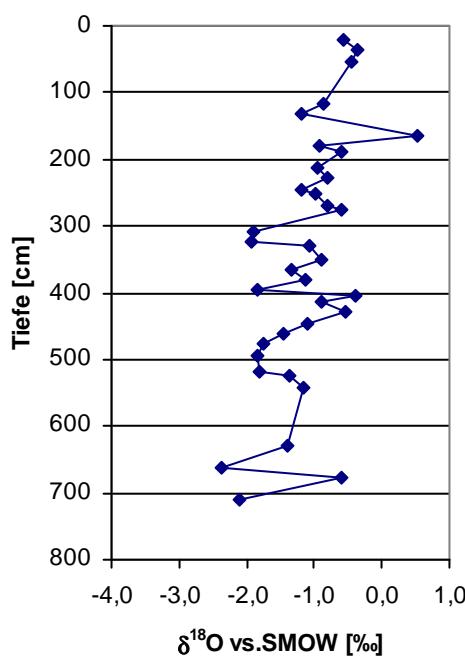


Abbildung 7-11: Differenzen der $\delta^{18}\text{O}$ – Werte der Fraktionen Bulk und Branch ($N = 35$).

Die zweite signifikante Korrelation besteht für die Differenz von Eriophorum und Bulk (s. Abbildung 7-12). Die Korrelation mit der Tiefe ist negativ ($r = -0,61$). Da jedoch der Analyse nur 12 Werte zugrunde lagen, die nicht gleichmäßig über den Kern verteilt sind, sind für Schlüsse aus dem Ergebnis weitere Vergleiche empfehlenswert.

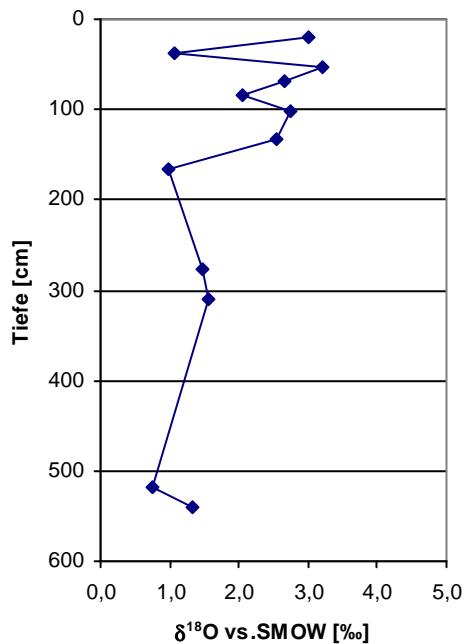


Abbildung 7-12: Differenzen der $\delta^{18}\text{O}$ – Werte der Fraktionen Bulk und Eriophorum ($N = 12$).

Die Differenzen der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte korrelieren bis auf zwei Kombinationen der Fraktionen nur sehr gering bis gering mit der Tiefe (s. Tabelle 8-9, Anhang). Die Differenz zwischen Stem und Vaccinium weist einen Korrelationskoeffizient von -0,46 auf.

Die Differenz von Branch und Stem zeigt eine hoch signifikante negative mittlere Korrelation ($r = -0,69$) mit der Tiefe (s. Abbildung 7-13).

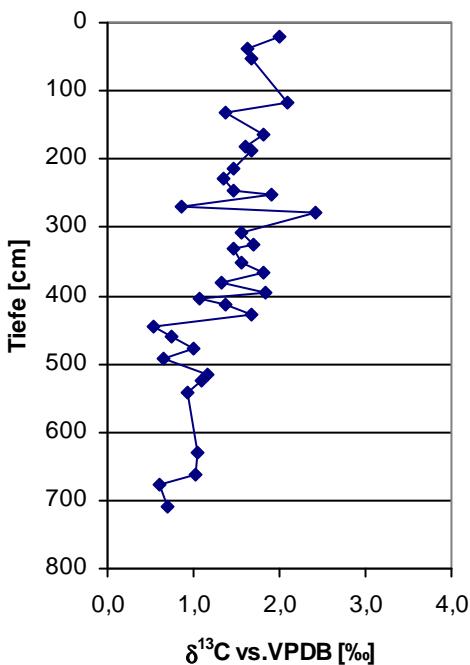


Abbildung 7-13: Differenzen der $\delta^{13}\text{C}$ - Werte der Fraktionen Branch und Stem (N = 35).

Hervorzuheben ist die Differenz der $\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Fraktionen Branch und Stem. Wenn man *Sphagnum* in den Fraktionen Branch und Stem untersucht, lässt sich aus den Ergebnissen der Korrelationsanalyse schließen, dass für dieses Profil eine Beeinflussung des Klimasignals abhängig von der Tiefe vorliegt. Dies könnte beispielsweise auf chemische Abbauprozesse in einer der beiden Fraktionen Stem oder Branch zurückzuführen sein. Für die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte eines Torfprofils würde eine Abhängigkeit des Signals von der Tiefe zusätzlich zu Umweltfaktoren eine Korrektur der Werte nötig machen. Dafür wären Untersuchungen zur Kalibrierung dieser Korrekturen nötig. Der Einfluss dieser Veränderungen in der Differenz der beiden Fraktionen sollte in einer Interpretation des Signals als Klimaproxy beachtet werden.

8 Methodenkritik

Die Standardabweichung wurde in den Abbildungen nicht berücksichtigt, da die Standardabweichung der replikaten Messungen unterhalb der Messgenauigkeit lag. Für die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte bedeutet dies eine Standardabweichung von weniger als 0,3 ‰ und für die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte eine Standardabweichung von weniger als 0,1 ‰.

Die Erfassung der Artenzusammensetzung von *Sphagnum* sollte immer im Rahmen einer paläobotanischen Untersuchung der Makroreste des Torfmaterials durchgeführt werden. Eine paläobotanische Untersuchung kann so Aufschluss geben, wie viel Anteil die artspezifische Fraktionierung der Isotope an dem Signal hat. Die Auszählung der Ästchen sollte dabei Vorgaben von BARBER ET AL. 2004 folgen.

Außerdem ist in dieser Untersuchung nicht auszuschließen, dass die Korrelation der Bulkproben mit den *Sphagnum* - Pflanzenteilen auf einer Dominanz des *Sphagnum* im Torfmaterial beruht. Eine paläobotanische Untersuchung könnte hier Abschätzungen der Anteile der einzelnen Pflanzenarten liefern. Die Vergleiche der Fraktionen *Vaccinium* und *Eriophorum* sollten anhand von größeren Stichproben genauer untersucht werden.

9 Abschließende Diskussion und Ausblick

Zwischen den Fraktionen Branch und Stem wurde sowohl in den Kohlenstoff- als auch in den Sauerstoffisotopenwerten ein signifikanter Unterschied festgestellt. Dieser ist über den gesamten Kern hin beobachtbar und im Falle der Sauerstoffisotopenwerte zum ersten Mal untersucht und festgestellt worden. Auffällig ist, dass die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte zwischen Bulk und Stem und die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte zwischen Bulk und Branch einen deutlichen Medianunterschied aufweisen. Wenn man von einer Dominanz von Sphagnum im Kern ausgeht, wäre zu erwarten, dass sich die beobachtete Differenz zwischen Branch und Stem auch im Verhältnis von Bulk zu Branch bzw. Stem ähnlich ausdrückt. Die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von Branch stimmen in den absoluten Werten eher mit Bulk überein als mit Stem. Bei den $\delta^{18}\text{O}$ -Werten ist genau das umgekehrte zu beobachten. Die Werte von Stem zeigen im absoluten Wert eine bessere Übereinstimmung mit der Fraktion Bulk. Vergleichbare Untersuchungen, die Kohlenstoff- und Sauerstoffisotopenverhältnisse der Fraktionen Branch, Stem und Bulk analysiert haben, liegen nicht vor. Eine mögliche Erklärung der Differenzen zu Bulk lässt sich somit zum jetzigen Forschungsstand nicht finden.

Laut CLYMO (1970) bilden die Blätter und Ästchen annähernd zwei Drittel der Trockenmasse von *Sphagnum*. Wenn man also eine intakte *Sphagnum*-Pflanze auf die Isotopenzusammensetzung untersucht, nimmt man ein Signal auf, das zu zwei Dritteln aus dem der Blätter und Ästchen besteht und zu einem Drittel aus dem der Stämmchen. Untersucht man hingegen aus Torfmaterial separiertes *Sphagnum*, welches meist bereits in Teile der Ästchen und Stämmchen zerfallen ist, müsste man eine genaue Bestimmung der Größenanteile der Fraktionen an der Trockenmasse vornehmen. Ansonsten könnte der sowohl in den Sauerstoffisotopen als auch in den Kohlenstoffisotopen vorgefundene signifikante Unterschied der Mediane von Branch und Stem das Signal so stark beeinflussen, dass die eigentliche Information verloren geht. Die Variation der Isotopenwerte zwischen den einzelnen Proben ist teilweise so gering, dass eine Veränderung des Anteiles einer Fraktion an der Trockenmasse bereits das mögliche Signal maskieren kann.

AUCH MÉNOT-COMBES ET AL. (2002) weisen aufgrund von Ergebnissen der Untersuchung rezenter Pflanzen entlang eines Höhentransekts darauf hin, dass das $\delta^{18}\text{O}$ - und auch das $\delta^{13}\text{C}$ -Signal von Cellulose der Pflanzen von der einzelnen Spezies abhängig ist und somit Untersuchungen von Bulk-Torfmaterial zu falschen Interpretationen führen können. Einzelne Arten sind im Vergleich besser geeignet für eine Rekonstruktion von Umweltbedingungen als andere, da teilweise keine Reaktion auf Veränderungen der Umweltparameter festzustellen ist (MÉNOT-COMBES ET AL.

2002, MÉNOT UND BURNS 2001) Eine paläobotanische Untersuchung der Zusammensetzung des Torfmaterials scheint im Rahmen einer Analyse der Isotopenzusammensetzung unerlässlich.

Die beobachteten Unterschiede zwischen den Medianen der Gefäßpflanzen und der Fraktion Bulk weisen zusätzlich darauf hin, dass eine Betrachtung von Signalen einzelner Pflanzengruppen oder im besseren Fall von einzelnen Arten als Klimaproxy konsistenter Ergebnisse liefert als eine Untersuchung von zusammengefassten Fraktionen.

Um Isotopenverhältniswerte aus der Cellulose von Torfmaterial bzw. Fraktionen aus Torfmaterial als Klimaproxy zu verwenden, sollten vorher Untersuchungen zur artspezifischen Reaktion auf Umweltbedingungen durchgeführt werden. Das Signal aus der Cellulose von zusammengefassten Fraktionen kann ansonsten nicht genau interpretiert werden, da Unterschiede in der Artenzusammensetzung auch Unterschiede im Isotopensignal bedingen können. Eine Kalibrierung des Einflusses von Umweltfaktoren auf unterschiedliche Sphagnumarten könnte eine präzisere Analyse zulassen, da die Isotopenmesstechnik nur noch sehr geringe Probenmengen benötigt. Somit könnten einzelne Arten aus dem Torfmaterial eines Bohrkerns separiert werden und eine Korrektur des Signals würde eine Vergleichbarkeit der erhaltenen Ergebnisse ermöglichen.

10 Literatur

ARAVENA, R. UND WARNER, B. G. (1992): Oxygen-18 Composition of Sphagnum, and Microenvironmental Water relations. *The Bryologist* 95 (4), 445-448.

AUCOUR, A.-M., HILLAIRE-MARCEL, C. AND BONNEFILLE, R. (1996): Oxygen isotopes in cellulose from modern and Quaternary intertropical peatbogs: implications for palaeohydrology. *Chemical Geology* 129, 341-359.

BARBER, K.E., CHAMBERS, F.M., MADDY, D., STONEMAN, R., BREW, J.S., (1994). A sensitive high-resolution record of Late Holocene climatic change from a raised bog in northern England. *The Holocene* 4, 198–205.

BARBER, K. E. (1981): Peat stratigraphy and climatic change: a palaeoecological test of the theory of cyclic peat bog regeneration. Balkema, Rotterdam.

BLUNDELL, A. UND BARBER, K. (2005): A 2800-year palaeoclimatic record from Tore Hill Moss, Strathspey, Scotland: the need for a multi-proxy approach to peat-based climate reconstructions. *Quaternary Science Reviews* 24, 1261–1277.

BRENNINKMEIJER, C.A.M., VAN GEEL, B. AND MOOK, W.G. (1982): Variations in the D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios in cellulose extracted from a peat bog core. *Earth and Planetary Science Letters* 61, 283–90.

BÜHL, A. (2006): SPSS 14. Einführung in die moderne Datenanalyse. 10. überarb. u. erweiterte Aufl. Pearson Studium, München.

CHARMAN, D. J. (2002): Peatland and Environmental Change. John Wiley and Sons, Chichester, 2002.

CLYMO, R.S. (1970) The growth of Sphagnum: methods of measurement. *Journal of Ecology* 58, 13-51.

CZERNIK J. UND GOSLAR T. (2001): Preparation of graphite targets in the Gliwice Radiocarbon Laboratory for AMS ^{14}C dating. *Radiocarbon* 43, 283-291.

DANIELS, R.E. UND EDDY, A. (1985): Handbook of European Sphagna. Institute for Terrestrial Ecology, Huntingdon.

DUPONT, L.M. (1986): Temperature and rainfall variations in the Holocene based on comparative palaeoecology and isotope geology of a hummock and hollow (Bourtangerveen, The Netherlands). Review of Palaeobotany and Palynology 48, 71-159.

EIFELVEREIN (Hrsg.) (1988): Vulkaneifel um Manderscheid. Erlebnis einer Landschaft. 8. Aufl. Die schöne Eifel, Trier.

FARQUHAR, G.D.; LLOYD, J. (1993): Carbon and oxygen isotope effects in the exchange of carbon dioxide between terrestrial plants and the atmosphere. In: Ehleringer, J. R.; Hall, A. E.; Farquhar, G. D. (Hrsg.): Stable Isotopes and Plant Carbon Water Relations. Academic, San Diego, California: 47–70.

FARQUHAR, G.D., EHLERINGER, J.R., HUBICK, K.T. (1989): Carbon isotope discrimination and Photosynthesis. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 40, 503-537.

FAß, T. (2004): Hydrogeologie im Aguima Einzugsgebiet in Benin/Westafrika
http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online/math_nat_fak/2004/fass_thorsten (Stand Oktober 2008)

FORST, M.; HIERLMEIER, R. ; KIEBEL, A.; RUTHSATZ, B. (1997): Hoch- und Zwischenmoore in Trockenmaaren der Vulkaneifel. Angewandte Landschaftsökologie Heft 14. Bundesamt für Naturschutz (BfN), Bonn.

FRAHM, J.P. (2001): Biologie der Moose. 1 Aufl. Spektrum, Akad. Verlag, Heidelberg; Berlin.

FRAHM J. P. UND FREY W. (2004): Moosflora. 4. neu bearb. Aufl. Eugen Ulmer, Stuttgart

FRAHM, J.P. (2006): Moose. Eine Einführung. Weissdorn-Verlag, Jena.

FRANCEY, R. J., ALLISON, C. E., ETHERIDGE, D. M., TRUDINGER, C. M., ENTING, I. G., LEUENBERGER, M., LANGENFELDS, R. L., MICHEL, E. AND STEELE, L. P. (1999): A 1000-year high precision record of $d^{13}C$ in atmospheric CO_2 . Tellus B, 51, 170–193.

FRIEDLI, H., LOTSCHER, H., OESCHGER, H., SIEGENTHALER, U., AND STAUFFER, B. (1986): 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.

GIVELET, N., LE ROUX, G., CHEBURKIN, A., CHEN, B., FRANK, J., GOODSITE, M. E., KEMPTER, H., KRACHLER, M., NOERNBERG, T., RAUSCH N., RHEINBERGER, S., ROOS-BARRACLOUGH, F., SAPKOTA, A., SCHOLZ, C., SHOTYK, W. (2004): Suggested protocol for collecting, handling and preparing peat cores and peat samples for physical, chemical, mineralogical and isotopic analyses. *Journal of Environmental Monitoring*, 6, 481–492.

GOSLAR, T., VAN DER KNAAP, W. O., HICKS, S., ANDRIC, M., CZERNIK, J., GOSLAR, E., RÄSÄNEN, S., HYÖTYLÄ, H. (2005): Radiocarbon dating of modern peat profiles: pre- and post-bomb ^{14}C Variations in the construction of age-depth models. *Radiocarbon* 47 (1), 115-134.

GRAFENSTEIN VON U., ERLENKEUSER, H., MÜLLER, J., JOUZEL, J., JOHNSEN, S. (1998): The cold event 8200 years ago documented in oxygen isotope records of precipitation in Europe and Greenland. *Climate Dynamics* 14, 73-81.

HONG, Y. T., JIANG, H. B., LIU, T. S., ZHOU, L. P., BEER, J., LI, H. D., LENG, X. T., HONG, B. AND QIN, X. G. (2000): Response of climate to solar forcing recorded in a 6,000 year $\delta^{18}\text{O}$ time-series of Chinese peat cellulose. *The Holocene* 10, 1-7

HUMMEL, M. (1949): Zur postglazialen Wald-, Siedlungs- und Moorgeschichte der Vordereifel. *Planta* 37, 451-497

INDERMÜHLE, A., STOCKER, T. F., JOOS, F., FISHER, H., SMITH, H. J., WAHLEN, M., DECK, B., MASTROIANNI, D., TSCHUMI, H., BLUNIER, T., MEYER, R. UND STAUFFER, B. (1999): Holocene carbon-cycle dynamics based on CO_2 trapped in ice at Taylor Dome, Antarctica. *Nature* 398, 121–126.

KEMPTER, H. (1996): Der Verlauf des anthropogenen Elementeintrags in Regenwassermoore des westlichen Mitteleuropas während des jüngeren Holozäns. G. Fischer, Stuttgart; Jena; New York.

KENDALL, C. UND CALDWELL, E. A. (1998). Fundamentals of Isotope Geochemistry. In: Kendall, C. und McDonnell, J. J. (Hrsg.). (1998): Isotope Tracers in Catchment Hydrology. Elsevier Science, Amsterdam.

LOADER, N. L., McCARROLL, D., VAN DER KNAAP, W. O., ROBERTSON, I. UND GAGEN, M. (2007): Characterizing carbon isotopic variability in Sphagnum. *The Holocene* 17: 403-410.

MÄGDEFRAU, K. (1983): Bryophyta. In: Strasburger, E. (Begr.) (neu bearbeitet von Denffer, D.) (1983) Lehrbuch der Botanik für Hochschulen. 32. Aufl. Fischer Verlag, Stuttgart.

MAUQUOY, D. AND VAN GEEL, B. (2007): Mire and Peat Macros. In: Elias S. A. (Hrsg.) (2007): Encyclopedia of Quaternary Science. Elsevier.

McCARROLL, D. AND LOADER, N.J. (2006): Stable isotopes in terrestrial organic material. In: Elias, S. A. (Hrsg.) (2007): Encyclopedia of Quaternary science. Elsevier.

MÉNOT, G. AND BURNS, S.J. (2001): Carbon isotopes in ombrogenic peat bog plants as climatic indicators: calibration from an altitudinal transect in Switzerland. *Organic Geochemistry* 32, 233-245.

MÉNOT-COMBES G., BURNS, S.J. AND LEUENBERGER, M. (2002): Variations of $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ in plants from temperate peat bogs (Switzerland): implications for paleoclimatic studies. *Earth and Planetary Science Letters* 202, 419-434.

MERTES, H. (1983): Aufbau und Genese des Westeifeler Vulkanfeldes. Bochumer geologische und geotechnische Arbeiten Heft 9. Institut für Geologie der Ruhr-Universität Bochum, Bochum.

MEYER, W. (1994): Geologie der Eifel. 3. erg. Aufl., Schweizerbart, Stuttgart.

MORTIMER, C. E. U. MÜLLER, U. (2003): Chemie. Das Basiswissen der Chemie. 8. Auflage. Thieme, Stuttgart.

MOSER, H. UND RAUERT, W. (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie, Lehrbuch der Hydrologie. Band 8. Borntraeger, Berlin; Stuttgart.

RUNDEL P.W., EHLERINGER J.R. (1989): Stable Isotopes: History, Units, and Instrumentation. In: Ehleringer, J.R., Nagy, K.A., Rundel, P.W. (Hrsg.) (1989): Stable Isotopes in Ecological Research. Springer, New York; Berlin; Heidelberg.

OKLAND, R. H. (1990): A phytoecological study of the mire Northern Kisselbergmosen, SE Norway. III. Diversity and habitat niche relationships. Nordic Journal of Botany 10, 191-220.

PANCOST R. D., BAAS M., VAN GEEL B., SINNINGHE DAMSTE J. S. (2003): Response of an ombrotrophic bog to a regional climate event revealed by macrofossil, molecular and carbon isotopic data. The Holocene 13 (6), 921-932.

PRICE, G. D., MCKENZIE, J. E., PILCHER, J. R., HOPER, S. T. (1997): Carbon-isotope variation in Sphagnum from hummock-hollow complexes: implications for Holocene climate reconstruction. The Holocene 7 (2), 229-233.

RAMSEY C. B. (2008):

<http://c14.arch.ox.ac.uk/embed.php?File=oxcal.html> (Stand April 2008)

RYDIN, H. UND BARBER, K. E. (2001): Long-term and fine-scale coexistence of closely related species. Folia Geobotanica 36 (1), 53-62.

RYDIN H. UND JEGLUM J. K. (2008): The biology of peatlands. Oxford University Press, Oxford.

RYDIN, H., GUNNARSSON, U. & SUNDBERG, S. (2006): The role of Sphagnum in peatland development and persistence. In: Wieder, R. K. & Vitt, D. H. (Hrsg.) (2006): Boreal peatland ecosystems. Ecological Studies 188. Springer Verlag, , Berlin.

SAALWÄCHTER, K., BURCHARD, W., KLÜFERS, P., KETTENBACH, G., MAYER, P., KLEMM, D. UND DUGARMAA, S. (2000): Cellulose solutions in water containing metal complexes. Macromolecules 33, 4094-4107.

SCHLESER, G. H. (1995): Parameters determining carbon isotope ratios in plants. In: Frenzel, B. (Hrsg.) (1995): Problems of stable isotopes in tree rings, lake sediments and peat bogs as climatic evidence for the Holocene. Paläoklimaforschung / Palaeoclimate Research 15. G. Fischer, Stuttgart; Jena; New York.

SCHÖNWIESE, C. D. (2006): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. 4. verbesserte und erweiterte Aufl. Borntraeger, Berlin Stuttgart.

SHARP, Z. (2007): Principles of Stable Isotope Geochemistry. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River.

SMITH, A. J. E. (2004): The moss flora of Britain and Ireland. 2. Aufl., Cambridge University Press, Cambridge.

TREYDTE, K., ESPER, J., GÄRTNER, H. (2004): Stabile Isotope in der Dendroklimatologie. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 155 (6), 222-232.

TRUDINGER, C. M., ENTING I. G., FRANCEY, R. J., ETHERIDGE, D. M., RAYNER, P. J. (1999): Long term variability in the global carbon cycle inferred from a high precision CO₂ and δ¹³C ice-core record. Tellus B, 51 (2), 233-248.

UFZ (2008): Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ
<http://www.ufz.de/index.php?de=12245> (Stand November 2008)

WILLIAMS, T. G. (1996): Effect of changes in water content on photosynthesis, transpiration and discrimination against ¹³CO₂ and C¹⁸O¹⁶O in Pleurozium and Sphagnum. Oecologia 108, 38-46.

WISSEL H., MAYR C., LÜCKE A. (2008): A new approach for the isolation of cellulose from aquatic plant tissue and freshwater sediments for stable isotope analysis. Organic Geochemistry 39, (11) 1545-1561.

YAKIR, D. (1992): Variations in the natural abundance of oxygen-18 and deuterium in plant carbohydrates. Plant, Cell and Environment 15, 1005–1020.

ZANAZZI, A. AND MORA, G. (2005): Paleoclimate implications of the relationship between oxygen isotope ratios of moss cellulose and source water in wetlands of Lake Superior. Chemical Geology 222, 281-291.

ZOLITSCHKA, B. (1990): Spätquartäre jahreszeitlich geschichtete Seesedimente ausgewählter Eifelmaare. Documenta naturae 60.

11 Anhang

Tabelle 11-1: Statistisch geschätzte Grenzen innerhalb derer der Anteil des Taxon an der Grundgesamtheit liegt. Der Abschätzung liegt die erfasste Ästchenanzahl zugrunde.

Anzahl bestimmter Taxa	Untere Grenze [%]	Obere Grenze [%]
0	0,0	26,9
1	0,0	42,6
2	0,0	48,8
3	5,3	57,6
4	9,9	65,2
5	15,1	72,8
6	20,8	79,2
7	27,2	84,9
8	34,8	90,1
9	42,4	100,0
10	51,3	100,0
11	61,2	100,0
12	73,1	100,0

Tabelle 11-2: Ergebnisse der Bestimmung von 12 zufällig aus der Fraktion Branch ausgewählten *Sphagnum*-Ästchen.

Tiefe [cm]	S. Sektion <i>Acutifolia</i>	<i>Sphagnum</i> <i>magellanicum</i>	<i>Sphagnum</i> <i>palustre</i>	S. Sektion <i>Cuspidata</i>	Nicht bestimmbar	Summe
20-22		11	1			12
36-38	4	7	1			12
52-54	2	8	2			12
116-118	12					12
132-134	11				1	12
164-166	10			2		12
180-182	12					12
188-190	11			1		12
212-214	12					12
228-230	12					12
244-246	11			1		12
252-254	12					12
268-270	12					12
276-278	11		1			12
308-310	12					12
324-326	12					12
330-332	12					12
350-352	12					12
364-366	11			1		12
380-382	12					12
396-398	12					12
404-406	12					12
412-414	12					12
428-430	12					12
444-446	12					12
460-462	11			1		12
476-478	12					12
492-494	11			1		12
516-518	11				1	12
524-526	12					12
540-542	10				2	12
628-630	5				7	12
660-662	4		2		6	12
676-678	4				8	12
708-710	6				6	12

Tabelle 11-3: Ergebnisse der $\delta^{18}\text{O}$ -Messung. Angegeben in [‰] gegen den Standard SMOW. Differenz der Messwerte in [‰].

Tiefe (cm)	$\delta^{18}\text{O}$ vs. SMOW [‰]			Differenz Bulk-Branch [‰]	Differenz Bulk- Stem [‰]
	Bulk	Branch	Stem		
21	24,8	25,4	25,1	-0,6	-0,3
37	25,9	26,3	25,3	-0,4	0,6
53	24,4	24,9	23,9	-0,4	0,6
117	26,5	27,4	26,9	-0,9	-0,3
133	26,1	27,3	26,9	-1,2	-0,8
165	27,9	27,4	26,7	0,5	1,2
181	26,8	27,7	27,3	-0,9	-0,5
189	27,1	27,7	26,8	-0,6	0,3
213	26,5	27,4	26,7	-0,9	-0,2
229	27,3	28,1	27,5	-0,8	-0,1
245	25,7	26,9	26,1	-1,2	-0,4
253	27,0	28,0	27,0	-1,0	0,0
269	26,9	27,7	27,3	-0,8	-0,4
277	26,7	27,4	26,6	-0,6	0,2
309	27,0	28,9	27,7	-1,9	-0,7
325	26,2	28,2	27,1	-1,9	-0,9
331	26,1	27,2	26,8	-1,1	-0,7
351	26,7	27,6	26,6	-0,9	0,1
365	26,9	28,2	27,6	-1,3	-0,7
381	27,6	28,8	27,5	-1,1	0,1
397	25,7	27,5	26,9	-1,8	-1,2
405	27,4	27,8	27,1	-0,4	0,3
413	27,6	28,5	27,4	-0,9	0,2
429	27,8	28,3	27,6	-0,5	0,2
445	26,7	27,8	26,6	-1,1	0,0
461	27,7	29,1	26,9	-1,4	0,8
477	26,5	28,2	27,5	-1,7	-1,0
493	25,3	27,1	25,7	-1,8	-0,5
517	27,1	28,9	27,7	-1,8	-0,6
525	26,7	28,1	26,7	-1,4	0,1
541	26,6	27,7	26,7	-1,2	-0,1
629	26,2	27,6	27,3	-1,4	-1,2
661	24,9	27,3	27,3	-2,4	-2,4
677	26,8	27,4	26,5	-0,6	0,3
709	25,8	27,9	26,0	-2,1	-0,2

Tabelle 11-4: Ergebnisse der $\delta^{13}\text{C}$ -Messung. Angegeben in [%] gegen den Standard V-PDB. Differenz der Messwerte in [%].

Tiefe (cm)	$\delta^{13}\text{C}$ vs. VPDB [%]			Differenz Bulk- Branch [%]	Differenz Bulk-Stem [%]
	Bulk	Branch	Stem		
21	-25,3	-24,6	-26,6	-0,7	1,3
37	-26,0	-25,4	-27,0	-0,6	1,0
53	-26,2	-25,6	-27,3	-0,6	1,1
117	-24,1	-23,5	-25,6	-0,6	1,5
133	-25,1	-24,7	-26,1	-0,4	0,9
165	-25,1	-25,2	-27,1	0,2	2,0
181	-25,6	-25,7	-27,3	0,1	1,7
189	-25,0	-25,2	-26,9	0,2	1,9
213	-23,6	-23,7	-25,2	0,1	1,6
229	-24,5	-24,3	-25,7	-0,1	1,2
245	-26,2	-26,1	-27,6	-0,1	1,4
253	-24,2	-24,0	-25,9	-0,2	1,7
269	-25,1	-25,6	-26,5	0,5	1,3
277	-24,3	-23,8	-26,2	-0,5	2,0
309	-23,2	-22,7	-24,3	-0,5	1,1
325	-24,6	-23,6	-25,3	-1,0	0,8
331	-23,4	-23,3	-24,8	-0,1	1,4
351	-24,0	-24,0	-25,6	0,0	1,6
365	-23,5	-23,3	-25,1	-0,2	1,6
381	-23,4	-23,5	-24,8	0,1	1,4
397	-24,6	-23,2	-25,1	-1,4	0,5
405	-24,7	-25,1	-26,2	0,4	1,5
413	-24,3	-24,7	-26,1	0,3	1,7
429	-22,9	-23,0	-24,6	0,0	1,7
445	-24,3	-25,0	-25,5	0,7	1,2
461	-24,2	-24,4	-25,1	0,2	0,9
477	-25,0	-24,9	-25,9	-0,1	0,9
493	-24,2	-24,6	-25,3	0,4	1,0
517	-24,3	-25,0	-26,2	0,7	1,9
525	-24,3	-24,5	-25,6	0,1	1,2
541	-24,5	-24,8	-25,7	0,3	1,3
629	-24,3	-24,7	-25,7	0,4	1,4
661	-25,2	-25,0	-26,1	-0,2	0,8
677	-23,3	-24,5	-25,1	1,2	1,8
709	-23,6	-24,3	-25,0	0,7	1,4

Tabelle 11-5: Ergebnisse der $\delta^{13}\text{C}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Messung. Angegeben in [%] gegen den Standard V-PDB für $\delta^{13}\text{C}$ und SMOW für $\delta^{18}\text{O}$. Differenz der Messwerte in [%].

Tiefe [cm]	Messwerte der Fraktionen						Differenzen					
	$\delta^{18}\text{O}$ vs. SMOW [%]			$\delta^{13}\text{C}$ vs. VPDB [%]			$\delta^{18}\text{O}$ vs. SMOW [%]			$\delta^{13}\text{C}$ vs. VPDB [%]		
	Stem	Vaccinium	Bulk	Stem	Vaccinium	Bulk	Stem - Vaccinium	Stem - Bulk	Vaccinium - Bulk	Stem - Vaccinium	Stem - Bulk	Vaccinium - Bulk
21	25,1	27,1	24,8	-26,6	-25,6	-25,3	-2,0	0,3	2,3	-1,0	-1,3	-0,3
117	26,9	27,5	26,5	-25,6	-26,6	-24,1	-0,6	0,3	0,9	1,0	-1,5	-2,5
133	26,9	28,0	26,1	-26,1	-24,7	-25,1	-1,1	0,8	1,8	-1,3	-0,9	0,4
165	26,7	27,5	27,9	-27,1	-25,6	-25,1	-0,8	-1,2	-0,3	-1,4	-2,0	-0,6
493	25,7	26,9	25,3	-25,3	-25,2	-24,2	-1,2	0,5	1,7	-0,1	-1,0	-0,9
559	26,3	28,6	25,9	-26,5	-24,3	-24,7	-2,3	0,4	2,7	-2,2	-1,7	0,5
629	27,3	27,2	26,2	-25,7	-25,3	-24,3	0,2	1,2	1,0	-0,4	-1,4	-1,0
645	27,1	28,0	24,7	-26,9	-24,7	-25,6	-0,9	2,4	3,3	-2,2	-1,3	0,9
677	26,5	28,8	26,8	-25,1	-23,8	-23,3	-2,3	-0,3	2,0	-1,3	-1,8	-0,5
709	26,0	27,0	25,8	-25,0	-23,1	-23,6	-1,1	0,2	1,3	-1,9	-1,4	0,5
Messwerte der Fraktionen												
Tiefe [cm]	$\delta^{18}\text{O}$ vs. SMOW [%]			$\delta^{13}\text{C}$ vs. VPDB [%]			$\delta^{18}\text{O}$ vs. SMOW [%]			$\delta^{13}\text{C}$ vs. VPDB [%]		
	Stem	Eriophorum	Bulk	Stem	Eriophorum	Bulk	Eriophorum - Bulk	Eriophorum - Stem	Bulk - Stem	Eriophorum - Bulk	Eriophorum - Stem	Bulk - Stem
	25,1	27,8	24,8	-26,6	-25,2	-25,3	3,0	2,7	-0,3	0,1	1,4	1,3
37	25,3	27,0	25,9	-27,0	-23,8	-26,0	1,1	1,7	0,6	2,2	3,2	1,0
53	23,9	27,6	24,4	-27,3	-23,9	-26,2	3,2	3,8	0,6	2,3	3,4	1,1
69	26,5	28,4	25,7	-26,3	-23,2	-24,6	2,7	1,9	-0,8	1,4	3,0	1,7
85	26,6	28,8	26,7	-26,4	-23,3	-24,7	2,1	2,2	0,1	1,4	3,1	1,7
101	26,0	28,8	26,0	-26,9	-23,1	-25,0	2,7	2,8	0,0	1,8	3,7	1,9
133	26,9	28,7	26,1	-26,1	-22,6	-25,1	2,5	1,8	-0,8	2,5	3,5	0,9
165	26,7	28,9	27,9	-27,1	-22,1	-25,1	1,0	2,2	1,2	3,0	5,0	2,0
277	26,6	28,2	26,7	-26,2	-22,6	-24,3	1,5	1,6	0,2	1,7	3,6	2,0
309	27,7	28,6	27,0	-24,3	-22,8	-23,2	1,6	0,9	-0,7	0,3	1,4	1,1
517	25,7	27,9	27,1	-25,3	-22,5	-24,3	0,8	2,1	1,4	1,8	2,8	1,0
541	26,7	27,9	26,6	-25,7	-22,5	-24,5	1,3	1,2	-0,1	1,9	3,2	1,3

Tabelle 11-6: Ergebnisse des Tests auf Normalverteilung. Ab einer Signifikanz > 0,05 wird NV angenommen.

Fraktion	Messwert	N	Signifikanz
Bulk	$\delta^{18}\text{O}$	35	0,187
Branch	$\delta^{18}\text{O}$	35	0,003
Stem	$\delta^{18}\text{O}$	35	0,000
Bulk	$\delta^{13}\text{C}$	35	0,384
Branch	$\delta^{13}\text{C}$	35	0,721
Stem	$\delta^{13}\text{C}$	35	0,455
Eriophorum	$\delta^{18}\text{O}$	12	0,243
Bulk	$\delta^{18}\text{O}$	12	0,853
Stem	$\delta^{18}\text{O}$	12	0,331
Bulk	$\delta^{13}\text{C}$	12	0,759
Stem	$\delta^{13}\text{C}$	12	0,254
Eriophorum	$\delta^{13}\text{C}$	12	0,102
Stem	$\delta^{18}\text{O}$	10	0,764
Vaccinium	$\delta^{18}\text{O}$	10	0,257
Bulk	$\delta^{18}\text{O}$	10	0,789
Stem	$\delta^{13}\text{C}$	10	0,465
Vaccinium	$\delta^{13}\text{C}$	10	0,986
Bulk	$\delta^{13}\text{C}$	10	0,781

Tabelle 11-7: Ergebnisse des U-Rangtest nach Mann und Whitney zum Vergleich der Stichproben. Unterhalb einer Signifikanz von 0,05 wird ein Unterschied der Stichproben angenommen.

$\delta^{18}\text{O}$ - Werte		
Vergleich der Fraktionen	N	Signifikanz (2-seitig)
Bulk / Branch	35 / 35	0,00
Branch / Stem	35 / 35	0,00
Bulk / Stem	35 / 35	0,15
Stem / Vaccinium	10 / 10	0,00
Vaccinium / Bulk	10 / 10	0,00
Bulk / Stem	10 / 10	0,19
Eriophorum / Bulk	12 / 12	0,00
Bulk / Stem	12 / 12	0,71
Eriophorum / Stem	12 / 12	0,00
$\delta^{13}\text{C}$ - Werte		
Vergleich der Fraktionen	N	Signifikanz (2-seitig)
Bulk / Branch	35 / 35	0,77
Branch / Stem	35 / 35	0,00
Bulk / Stem	35 / 35	0,00
Stem / Vaccinium	10 / 10	0,03
Vaccinium / Bulk	10 / 10	0,39
Bulk / Stem	10 / 10	0,00
Eriophorum / Bulk	12 / 12	0,00
Bulk / Stem	12 / 12	0,00
Eriophorum / Stem	12 / 12	0,00

Tabelle 11-8: Ergebnisse des Rangkorrelationstests nach Spearman (Signifikanz unter einem Wert von 0,05)

$\delta^{18}\text{O}$ - Werte			
Vergleich der Fraktionen	N	Korrelationskoeffizient	Signifikanz (2-seitig)
Bulk / Branch	35 / 35	0,7	0,00
Bulk / Stem	35 / 35	0,55	0,00
Branch / Stem	35 / 35	0,71	0,00
Eriophorum / Bulk	12 / 12	0,52	0,08
Eriophorum / Stem	12 / 12	0,71	0,01
Bulk / Stem	12 / 12	0,65	0,02
Stem / Vaccinium	10 / 10	0,41	0,24
Bulk / Stem	10 / 10	0,31	0,39
Vaccinium / Bulk	10 / 10	0,33	0,35

$\delta^{13}\text{C}$ - Werte			
Vergleich der Fraktionen	N	Korrelationskoeffizient	Signifikanz (2-seitig)
Bulk / Branch	35 / 35	0,79	0,00
Bulk / Stem	35 / 35	0,85	0,00
Branch / Stem	35 / 35	0,84	0,00
Eriophorum / Bulk	12 / 12	0,53	0,08
Eriophorum / Stem	12 / 12	0,46	0,13
Bulk / Stem	12 / 12	0,8	0,00
Stem / Vaccinium	10 / 10	0,44	0,2
Bulk / Stem	10 / 10	0,88	0,00
Vaccinium / Bulk	10 / 10	0,29	0,43

Tabelle 11-9: Vergleich der Differenzen der $\delta^{13}\text{C}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenwerte. Test der Differenzen auf NV (ab einer Signifikanz > 0,05 wird NV angenommen) und Korrelation mit der Tiefe (signifikant unter einem Wert von 0,05). Betrachtet wurden die Kombinationen aus den Fraktionen, die einen signifikanten Unterschied im Median aufweisen.

$\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Fraktionen	Signifikanz NV	N	Korrelationskoeffizient	Signifikanz (2-seitig)
Bulk / Branch	0,48	35	-0,56	0,00
Branch / Stem	0,16	35	0,33	0,05
Stem / Vaccinium	0,42	10	-0,91	0,80
Vaccinium / Bulk	0,97	10	0,18	0,63
Eriophorum / Bulk	0,28	12	-0,61	0,04
Eriophorum / stem	0,68	12	-0,55	0,07

$\delta^{13}\text{C}$ -Werte der Fraktionen	Signifikanz der NV	N	Korrelationskoeffizient	Signifikanz (2-seitig)
Branch / Stem	0,71	35	-0,69	0,00
Bulk / Stem	0,81	35	-0,09	0,61
Stem / Vaccinium	0,36	10	-0,46	0,19
Bulk / Stem	0,73	10	-0,25	0,49
Eriophorum / Bulk	0,51	12	0,11	0,73
Bulk / Stem	0,12	12	0,01	0,98
Eriophorum / Stem	0,06	12	0,03	0,93

Danksagung

Ich bedanke mich bei meinen Gutachtern Herrn Prof. Dr. Otto Klemm und Herrn Prof. Dr. Harald Strauß für die gute Betreuung. Für Diskussionen und Anregungen zu meiner Arbeit standen sie mir jederzeit zur Verfügung.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Dr. Robert Moschen bedanken, der die Durchführung der Untersuchung am Forschungszentrum Jülich ermöglichte. Bei Herrn Holger Wissel bedanke ich mich ganz herzlich für die gute Zusammenarbeit im Labor und die Unterstützung bei den chemischen Analysen und Isotopenmessungen.

Mein Dank gilt außerdem Herrn Dr. Bas van Geel von der University of Amsterdam für die Erklärungen zur Bestimmung der Makrofossilien des Sphagnum.

Zudem danke ich allen, die die Arbeit oder Teile davon gelesen haben und mit Ihren Anmerkungen voran gebracht haben.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Münster, Dezember 2008

Ingo Rehberger